Vol.13, No.4, Winter 2024, pp.159-196 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2024.88777.1498 Open access

Comparison of different multi-criteria decision-making methods in flood prioritization of Kashafrood sub-basins

Maryam Zare[a], Mahmood Azari[b*], Mohsen Rezaei Arefi [c]

[a] *MSc Student in Watershed Science and Engineering, Department of Range and Watershed Management, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*
[b]*Associate Professor in Watershed Science and Engineering, Department of Range and Watershed Management, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*
[c] *Assistant Professor in Geomorphology, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran.*

Received: 2 July 2024 ***Revised: 25 August 2024*** ***Accepted: 29 August 2024***

Extended Abstract

Introduction

Flooding is one of the most destructive environmental phenomena, causing significant human and socioeconomic losses worldwide every year. Over the past two decades, the frequency of floods worldwide has increased by more than 40%. Between 1995 and 2015, approximately 109 million people were affected by floods annually, with damages amounting to 58 billion Euros (75 billion USD) annually (Khosravi et al., 2019). . In Iran, floods are the most dangerous natural phenomenon, causing significant human and financial losses in various parts of the country annually. Historically, floods have been recognized as the most frequent, deadly, and costly natural hazard (Hejazi, Andariani, Almaspour & Mokhtari Asl, 2015).

Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods have been implemented in diverse areas of water management, including evaluating flood management options, optimizing resource allocation, and assessing flood risk potential. Compared to models based on physical watershed characteristics, MCDM methods require less detailed information and generally provide high prediction accuracy (Dou et al., 2015). Therefore, this study aims to assess the flood risk of the Kashafrood River sub-basins using morphometric indices and various MCDM methods.

Material and Methods

The study area is located between 9°E longitude and 35°38´ to 37°N latitude, covering an area of 15,650 square kilometers. This applied research integrates data analysis,

---

* . Corresponding author: Mahmood Azari E-mail: m.azari@um.ac.ir Tel:+989155085732

How to cite this Article: zare, M. , Azari, M. , & rezaei arefi, M. (2024). Comparison of different multi-criteria decision-making methods for prioritization of flood source areas in Kashafrood basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4),159-196

geographic information systems (GIS), morphometric parameters, and multi-criteria decision analysis techniques. Data analysis was conducted using ArcGIS and Excel software.

Morphometric data were extracted and analyzed to enable pairwise comparisons for hierarchical and network analysis methods, calculating the relative importance and validity of parameters.

The TOPSIS method, introduced by Yun in 1980 and further developed by Yun and Wang in 1981, is widely used in multi-indicator decision-making. The VIKOR method, first introduced by Aperivik in 1979, focuses on selecting and ranking alternatives based on conflicting criteria (Mardani, Zavadskas, Govindan, Amat Senin & Jusoh, 2016). The ELECTRE method, developed by Bernard Roy in the 1960s, uses dominance relationships to compare alternatives.

Validation of the models was performed using percentage change analysis and recorded flood points in the region.

Results and Discussion

The criteria for this research were the morphometric characteristics of the 20 studied sub-basins, extracted using a Digital Elevation Model (DEM). These characteristics were categorized into three groups: linear, surface, and relief parameters.

Linear parameters included watercourse length and branching ratio. Basins with longer watercourses typically produce higher runoff and faster peak flow during rainstorms compared to basins with shorter watercourses (Batt, 2019). Surface parameters included basin area (A), basin length (Lb), basin perimeter (P), shape factor (Ff), drainage density (Dd), roundness ratio (Rc), elongation ratio (Re), texture ratio (Tr), waterway density (Fs), shape index (Bs), and holding constant (C). Relief parameters included basin elevation (Bh), elevation ratio (Rr), and elevation number (Rn). Basin elevation (Bh) indicates slope, waterway gradient, and runoff discharge.

The prominence value of the studied sub-basins ranged from 2247 to 1049 meters, with the highest prominence observed in sub-basins K04, K09, and K13, and the lowest in sub-basins K05, K12, K14, and K17. Among the criteria, basin area (weight: 0.188) was the most significant, while basin prominence (weight: 0.008) was the least significant. The compatibility ratio of the parameters was 0.05, indicating valid comparisons since the value is below the threshold of 0.1.

The percentage change analysis revealed that the ANP method exhibited the lowest variability (25%), while the AHP and TOPSIS methods showed the highest variability. A comparison of observed flood points with model results indicated that the ANP method had the highest correlation with flood points, followed by the AHP method, while the ELECTRE method exhibited the lowest correlation.

Conclusion

To prepare a flood zoning map for the studied sub-basins, multi-criteria decision-making (MCDM) methods such as AHP, ANP, TOPSIS, VIKOR, and ELECTRE were employed. Morphometric criteria were utilized to evaluate the performance of these methods.

The sub-basins were classified into five flood risk classes by each method. According to the AHP method, 53.6% of the area was classified as high and very high flood risk. The ANP method classified 50% of the area as high and very high flood risk. The TOPSIS method classified 47.6% of the area as high and very high flood risk. The VIKOR method identified 61.13% of the area as high and very high flood risk, while the ELECTRE method classified 50.75% of the area in this category.
Validation using flood points showed that the ANP method had the highest accuracy. The percentage change analysis also confirmed that the ANP method exhibited the lowest variability.
These findings suggest that morphometric indices and MCDM methods are effective tools for assessing flood risk in watersheds. However, flood risk mapping is an iterative process requiring periodic updates due to changes in land use, weather patterns, and other factors influencing flood dynamics. Regular reassessment and updating of flood risk maps are essential for accurate and effective flood management.

Keywords: Flood Risk Assessment, Morphometric Analysis, Multi-Criteria Analysis, Kashafrood Watershed, Khorasan Razavi, Watershed Management and Prioritization.

How to cite this Article: zare, M. , Azari, M. , & rezaei arefi, M. (2024). Comparison of different multi-criteria decision-making methods for prioritization of flood source areas in Kashafrood basin. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4),159-196

جلد ۱۳، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۳، ص ۱۹۶-۱۵۹

ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/geoeh.2024.88777.1498 دسترسی آزاد

مقایسه روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره در اولویت‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌های آبخیز کشف‌رود

مریم زارع - دانشجوی کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

محمود آذری[1]- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

محسن رضائی عارفی- گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

تاریخ دریافت:۱۴۰۳/۴/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۶/۴ تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۶/۸

چکیده

سیل یکی از رایج‌ترین خطرات طبیعی است که هم زندگی و هم دارایی‌های مردم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تغییرات آب و هوایی اخیر باعث افزایش فراوانی و شدت سیل شده است. در چنین شرایطی شناسایی مناطق بالقوه خطر سیل برای کاهش خسارات ناشی از سیل بسیار مهم است. ازاین‌رو، این مطالعه با استفاده از شاخص‌های مورفومتری و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به دنبال شناسایی مناطق آسیب‌پذیر سیلاب در زیرحوضه‌های حوضه آبخیز کشف رود است. بدین منظور ۱۶ شاخص مورفومتری از DEM منطقه استخراج شد و سیل‌خیزی زیرحوضه‌های مختلف با استفاده از ۵ روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل AHP، ANP، VIKOR، TOPSIS و ELECTRE تعیین گردید و در پنج طبقه سیل‌خیزی خیلی‌زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی‌کم طبقه‌بندی شد. نتایج روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چندمعیاره با استفاده از همبستگی اسپیرمن و بررسی درصد تغییرات مورد ارزیابی قرار گرفت. درنهایت مشخص گردید روش ANP در تهیه نقشه سیل‌خیزی حوضه دارای دقت بیشتری است و اختلاف معنی‌داری بین روش ANP،AHP و VIKOR با نقشه سیل‌خیزی حوضه بر اساس داده‌های مشاهداتی وجود ندارد. در بررسی درصد تغییرات نیز مشخص شد کمترین درصد تغییرات مربوط به روش ANP است. بر اساس نتایج این روش ۲۴/۳ درصد

[1] . نویسنده مسئول: ۰۹۱۵۵۰۸۵۷۳۲ Email: m.azari@um.ac.ir

حوضه در طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد و ۲۵/۷ درصد در طبقه زیاد قرار دارند و درمجموع بیش از ۵۰ درصد حوضه در طبقه سیل‌خیزی زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرند.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی خطر سیل ، تحلیل ریخت‌سنجی ، تحلیل چندمعیاره ، حوضه آبخیز کشف‌رود، خراسان رضوی، مدیریت و اولویت‌بندی حوضه آبخیز.

۱- مقدمه

یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های طبیعی، سیل است که هرساله خسارات انسانی و خسارات اقتصادی اجتماعی قابل‌توجهی را در سراسر جهان به همراه دارد. طی دو دهه گذشته، فراوانی سیل در سراسر جهان بیش از ۴۰ درصد افزایش یافته است. بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۵، نزدیک به ۱۰۹ میلیون نفر در سراسر جهان تحت تأثیر سیل قرار گرفته‌اند که خسارت آن به ۵۸ میلیارد یورو (۷۵ میلیارد دلار آمریکا) در سال می‌رسد (Khosravi et al., 2019). سیل به‌عنوان مخاطره‌آمیزترین پدیده طبیعی در ایران همه‌ساله خسارات جانی و مالی زیادی در نقاط مختلف کشور به بار می‌آورد. این مخاطره در طول تاریخ، رایج‌ترین، مرگبارترین و پرهزینه‌ترین خطر در میان مخاطرات طبیعی قلمداد شده است (Hejazi, Andariani, Almaspour & Mokhtari Asl, 2015). در ۶۰ سال اخیر بیش از ۳۷۰۰ مخاطره سیل در ایران گزارش شده است. به‌گونه‌ای که در دهه ۱۳۳۰ تعداد ۲۰۱ مورد سیل به وقوع پیوسته اما در دهه ۱۳۶۰ تعداد ۴۰۲ مورد سیل اتفاق افتاده است (Sharifi, 2002). وسعت نواحی سیل‌خیز ایران حدود ۹۱ میلیون هکتار برآورد شده است و ۵۵ درصد از مساحت حوضه‌های آبخیز کشور در تولید رواناب مستقیم و تند تأثیر داشته‌اند که ۴۲ میلیون هکتار آن دارای شدت سیل‌خیزی متوسط تا خیلی زیاد است (Parvaresh, Mahdavi, Malekian, Esmaeilipoor & Holisaz, 2018).

یکی از اقدامات مهم در راستای کنترل سیلاب، اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از نظر سیل‌خیزی است تا در صورت اجرای عملیات حفاظتی، نواحی دارای اولویت‌های سیل‌خیزی بیشتر را شناسایی و اهمیت بیشتری به این نواحی داده و عملیات حفاظت آب در این مناطق متمرکز گردند (Razavizadeh & Shahedi, 2015). برای تعیین سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها از روش‌های بسیاری استفاده شده است. استفاده از روش‌های آماری برای بررسی همبستگی ویژگی‌های سیل با برخی ویژگی‌های فیزیکی حوضه‌های‌آبخیز یکی از این رویکردهاست. مدل‌های

هیدرولوژیکی از دیگر روش‌هایی است که توسط پژوهشگران برای مطالعه سیل و سیل‌خیزی در حوضه-های‌آبخیز استفاده شده‌اند (Rahimpour, Rezaei Moghaddam, Hejazi & Valizadeh Kamran, 2023). این مدل‌ها به علت نیاز به داده‌های مکانی، هواشناسی و هیدرومتری برای واسنجی و اعتبارسنجی با مشکلاتی روبرو هستند. در سال‌های اخیر، سنجش‌ازدور و GIS به‌طور گسترده برای تهیه نقشه خطر سیل و آسیب‌پذیری مورداستفاده قرار گرفته است (Aher, Adinarayana & Gorantiwar, 2014). ازآنجاکه وقوع و شدت سیل تحت تأثیر عوامل مختلفی است، تخمین ریسک سیل مبتنی بر چند معیاره، نسبت به تخمین ریسک سیل مبتنی بر تک معیار نتایج قابل‌اعتمادتری را به دنبال خواهد داشت. ازاین‌رو استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره،[1] همچون فرآیند تحلیل شبکه (Zzaman, Nowreen, Billah & Islam, 2021)، شبکه عصبی مصنوعی (Ahmed, Hoque, Howlader & Pradhan, 2022)، درخت تصمیم (Tehrany, Pradhan & Jebur, 2013)، ماشین بردار پشتیبان (Ganjirad & Delavar, 2023)، کاربرد فراوانی در مطالعات سیل داشته است.

تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره در ترکیب با تحلیل مورفومتریک به‌طور گسترده به‌منظور اولویت‌بندی و ارزیابی حساسیت حوضه‌های‌آبخیز به سیلاب استفاده شده است (Akay & Baduna Koçyiğit, 2020). برخی از روش‌های MCDM که در مدیریت آب به کار گرفته شده‌اند، عبارتند از تکنیک ترتیب اولویت براساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) (Aouragh & Essahlaoui, 2018)، فرآیند تحلیل شبکه (ANP) (De Brito, Evers & Almoradie, 2018)، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) (Chaulagain et al., 2023)، ELECTRE (Teimouri & Alvandi, 2022) و روش ویکور (VIKOR)(Khosravi et al., 2019).

در ارتباط با موضوع پژوهش رحمان و همکاران (Rahaman, Ajeez, Aruchamy & Jegankumar, 2015) با استفاده از ویژگی‌های مورفومتریک و فرایند تحلیل سلسله مراتبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی به اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها در حوضه آبخیز کالار پرداختند و زیرحوضه‌های آبخیز به پنج پهنه با اولویت بسیار کم، کم، متوسط، بالا و بسیار بالا تقسیم شدند. در این تحقیق نتیجه گرفتند که تکنیک AHP فازی یک

[1] Multi-Criteria Decision-Making (MCDM)

رویکرد عملی برای شناسایی و اولویت‌بندی مناطق حساس است. اوراق و اساحلاوی (Aouragh & Essahlaoui, 2018) به تحلیل مورفومتریک مبتنی بر رویکرد TOPSIS جهت اولویت‌بندی حوضه‌های آبخیز در اومارابیا در مراکش پرداختند. هدف آن‌ها از این پژوهش رتبه‌بندی حوضه از لحاظ حساسیت به سیل-خیزی و فرسایش بود. در این پژوهش ابتدا ۹ پارامتر موفومتریک با استفاده از DEM استخراج شد و با استفاده از روش TOPSIS وزن نسبی پارامترها مشخص شد. نتایج نشان داد که زیرحوضه‌های ۲ و ۶ با ضرایب ۰/۶۸۳۸ و ۰/۶۷۸۸ بیشترین حساسیت را از منظر سیل و فرسایش دارند. آکای و بادونا (Akay & Baduna Koçyiğit, 2020) در پژوهشی با عنوان اولویت‌بندی پتانسیل سیل ناگهانی زیرحوضه‌ها در یک حوضه در ترکیه با استفاده از روش‌های سنتی و تصمیم‌گیری چند معیاره به این نتیجه رسیدند که روش AHP به‌خوبی می‌تواند زیرحوضه‌های با پتانسیل سیلابی بالاتر را پیش‌بینی کند. همچنین روش اتخاذ شده برای تعیین وزن معیارهای به‌دست‌آمده از روش ANP قابلیت پیش‌بینی این روش‌ها به‌ویژه VIKOR را بهبود می‌بخشد. امسبی و ماکونیو (Msabi & Makonyo, 2021) در پژوهشی با عنوان بررسی حساسیت به سیل با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و تجزیه‌وتحلیل تصمیم‌گیری چند معیاره در منطقه دودوما در تانزانیا مرکزی اقدام به تهیه نقشه حساسیت به سیل منطقه بر اساس روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) کردند. نتایج به دست آمده با نقشه سیل‌های تاریخی رخ داده در منطقه اعتبارسنجی گردید که دلالت بر دقت ۸۷/۲۴ درصد مدل داشت. چائولاگین و همکاران (Chaulagain et al., 2023) با استفاده از روش‌های تصمیم-گیری چند معیاره ازجمله فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و ترکیب خطی وزن‌دار در سیستم اطلاعات جغرافیایی، اقدام به تهیه نقشه حساسیت سیل در کلان‌شهر کاتماندو نمودند. آن‌ها از شش معیار خطر سیل شامل، شیب، ارتفاع، تراکم زهکشی، بارندگی، کاربری زمین و پوشش و فاصله از رودخانه برای تهیه نقشه حساسیت به سیل استفاده نمودند. در این میان، فاصله از رودخانه مهم‌ترین معیار و پس از آن بارندگی و کاربری اراضی و پوشش اراضی بود. نتایج نشان داد که بخش زیادی از منطقه (۵۶٪) در پهنه پتانسیل سیلابی متوسط و ۳۲٪ در پهنه با پتانسیل سیلاب زیاد و ۱۱٪ در پهنه با پتانسیل سیلاب کم قرار دارند. قربان‌زاده و همکاران (Ghorbanzade, Azarakhshi, Mosaedi & Rostami Khalaj, 2017) کارآیی تحلیل سلسله مراتبی در تشخیص نواحی مستعد مخاطره سیلاب شهری در بخش مرکزی شهر تربت‌حیدریه را بررسی کردند. نتایج نشان داد که

بیشترین وسعت منطقه مربوط به منطقه کم‌خطر (۱۲۶/۸ هکتار) و کمترین وسعت مربوط به طبقه خیلی پرخطر ۲۸/۴ هکتار است. پرورش و همکاران (Parvaresh et al., 2018) در پژوهشی با عنوان اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر بر سیل‌خیزی به کمک مدل الکتره نوع ۳ و ضریب جریان سیلابی در زیرحوضه‌های آبخیز سرخون بندرعباس به این نتایج دست یافتند که مدل الکتره می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب برای تعیین پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌های دارای اولویت معرفی شود. عرب عامری و همکاران (Arab Ameri, Pour Ghasemi, Rezaei & Sohrabi, 2019) اولویت‌بندی مورفومتریک حوضه‌های آبخیز به‌منظور مدیریت بهینه آب‌وخاک را با ۱۳ پارامتر مورفومتریک شکلی، خطی و توپوگرافیک و مدل ترکیبی تاپسیس-رگرسیون خطی چند متغیره انجام دادند و به این نتیجه رسیدند زیرحوضه‌های ۴، ۶ و ۹ به ترتیب با کمترین فاصله از ایده آل مثبت و بیشترین فاصله از ایده آل منفی و با کسب بیشترین امتیاز در رتبه‌های اول تا سوم قرار گیرند. رحیم‌پور و همکاران (Rahimpour et al., 2023) در پژوهشی با عنوان تحلیل خصوصیات هیدروژئومورفولوژیک حوضه آبخیز الند چای با هدف اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها از نظر حساسیت سیل‌خیزی به این نتیجه رسیدند که زیرحوضه‌های۳، ۱، ۴ و ۲ از حساسیت سیل‌خیزی بالایی برخوردار می‌باشند. در مقابل زیرحوضه ۱۳ و زیرحوضه ۶، به ترتیب کمترین وزن را از نظر ۲۲ عامل موردبررسی داشته و در نتیجه در طبقه خیلی کم از نظر حساسیت سیل‌خیزی قرار می‌گیرد. تیموری و الوند (Teimouri & Alvandi, 2022) به مقایسه مدل‌های VIKOR، ELECTRE، SAW و TOPSIS به‌منظور بررسی اولویت فرسایش‌پذیری و سیل‌خیزی زیرحوضه‌های آبخیز بنکوه استان تهران پرداختند. در این مطالعه از ۱۱ پارامتر مورفومتریک استفاده شد و با استفاده از روش AHP وزن هریک از شاخص‌ها محاسبه شد و بعد از انجام تحلیل‌ها با استفاده از مدل‌های فوق نتیجه گرفتند که روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، یک رویکرد عملی و مناسب برای تصمیم‌گیری بهتر برای تعین سیل‌خیزی هستند. حسین زاده و همکاران (Hosseinzadeh, Salehi Milani & Rezaian Zarandini, 2023) حساسیت زیرحوضه‌های حوضه نکا را نسبت به سیل‌خیزی تعیین کردند. در این پژوهش به‌منظور تهیه نقشه حساسیت زیرحوضه‌ها نسبت به سیل‌خیزی حوضه از ۱۱ لایه اطلاعاتی استفاده شد و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی وزن لایه‌ها تعیین گردید سپس با استفاده از روش ترکیبی خطی وزنی در نرم‌افزار ARC GIS مبادرت به تهیه نقشه سیل‌خیزی در پنج طبقه کردند.

تاکنون روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره معرفی شده است که بر اساس پیشینه پژوهش در حوزه‌های مختلف مدیریت آب ازجمله مدیریت سیل و سیل‌خیزی هم استفاده شده است بااین‌وجود کارایی هر یک از این روش‌ها تاکنون موردبررسی قرار نگرفته است ازاین‌رو هدف این پژوهش مقایسه ۵ روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل AHP، ANP، VIKOR، TOPSIS و ELECTRE در تعیین سیل‌خیزی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های آبخیز کشف رود در استان خراسان رضوی است. زیرحوضه‌های بالادست حوضه آبخیز کشف رود به دلیل تغییرات اقلیمی و تغییرات کاربری اراضی ناشی از رشد جمعیت پتانسیل بالایی برای بروز سیلاب و مخاطرات ناشی از آن دارند. به‌طوری‌که از سال ۱۳۳۵ تا ۱۹۹۶ نزدیک به ۹۸ سیلاب در این حوضه به وقوع پیوسته است.

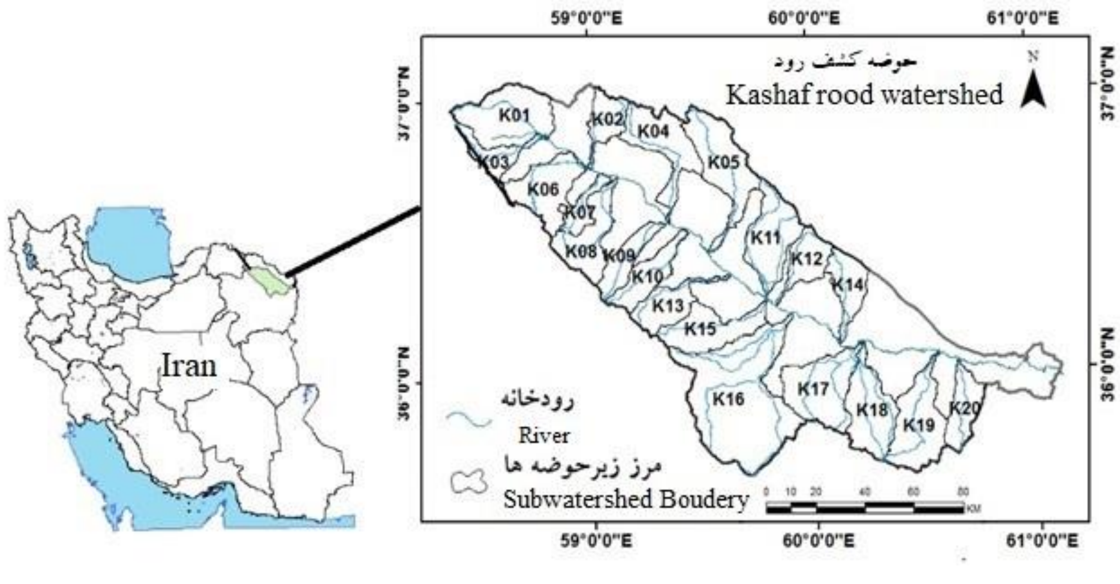
۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-منطقه موردمطالعه

حوضه‌آبخیز کشف‌رود به مساحت ۱۵۶۵۰ کیلومترمربع در مختصات جغرافیایی ' ۲۲ °۵۷ تا'۹ °۶۱ طول شرقی و '۳۸ °۳۵ تا °۳۷ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱). این حوضه از شمال به ارتفاعات هزارمسجد-کپه داغ، از جنوب به ارتفاعات بینالود، از غرب به ارتفاعات کوه‌های خواجه علی، پشته‌پر و شاه‌جهان و از شرق به رودخانه هریرود منتهی می‌شود. رودخانه‌ای که این حوضه را زهکشی می‌کند کشف‌رود نام دارد. رودخانه کشف رود پس از عبور از دشت مشهد در محلی به نام پل خاتون در مرز کشور ترکمنستان به هریرود می‌پیوندد و رودخانه تجن را تشکیل می‌دهد (Dehghan, Hosseinpour Moghadam, Lashkaripour & Ghafouri, 2012). توپوگرافی منطقه رابطه مستقیم با ساختار زمین‌شناسی دارد. مورفولوژی کلی منطقه را کوه‌های بینالود در جنوب و کوه‌های هزارمسجد در شمال حوضه شکل داده که منطقه‌ای جوان محسوب می‌شود. میانگین بارندگی سالانه حوضه ۲۶۲ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه آن ۱۴ درجه سانتی‌گراد است. از نظر پوشش گیاهی منطقه دارای پوشش گیاهی فقیر مرتعی و درختان جنگلی پراکنده شامل درختان ارس در نواحی مرتفع است.

۲-۲-روش پژوهش

در این پژوهش ۱۶ شاخص مورفومتری در سه گروه پارامترهای خطی، سطحی و برجستگی شامل مساحت حوضه، محیط حوضه، طول آبراهه، طول حوضه، عامل شکل، نسبت انشعاب، تراکم زهکشی، نسبت گردی، نسبت کشیدگی، نسبت بافت، فراوانی آبراهه، شاخص شکل، شاخص نگهداشت آبراهه، برجستگی حوضه، نسبت برجستگی و عدد برجستگی با استفاده از ArcGIS 10.5 از DEM منطقه استخراج شد (جدول ۱). برای استخراج پارامترهای مورفومتری از DEM ۳۰ متر منطقه استفاده شد. پس از تهیه لایه مربوط به هر یک از شاخص‌ها در محیط GIS، وزن هر یک از لایه‌ها نیز از طریق روش AHP محاسبه گردید. در ادامه با استفاده از روش‌های AHP، ANP، TOPSIS، VIKOR و ELECTRE نقشه پهنه‌بندی سیل‌خیزی هر یک از زیرحوضه‌ها تهیه شد.



شکل ۱- نقشه موقعیت حوزه آبخیز کشف‌رود

Fig.1. Location map of KashafRood watershed

۲-۳-وزن دهی معیارها و تلفیق داده‌ها با روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

پس از تهیه نقشه‌های مورفومتری برای استفاده در روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، لازم است وزن هر عامل محاسبه گردد. برای این منظور جدول مقایسه زوجی پارامترها تهیه شد و برای تعیین ارجحیت هر معیار در اختیار اساتید دانشگاه‌ها و کارشناسان آبخیزداری قرار گرفت. در مرحله بعد با استفاده از ۵ روش تصمیم-گیری چندمعیاره شامل AHP، ANP، VIKOR، TOPSIS و ELECTRE نتایج ترکیب شد و نقشه‌های اولویت‌بندی زیرحوضه‌ها تهیه شد.

جدول ۱ - شاخص‌های مورفومتری منتخب در حوضه موردمطالعه

Table 1- Selected morphometric indices in the study area

منبع Refrence	رابطه Equation	علامت اختصار Acronym	مؤلفه Parameter
			پارامترهای خطی (Linear Parameters)
-	-	Lu	طول آبراهه (Stream length)
Schumm, 1956	Rb = Nu / Nu + 1*	R_b	نسبت انشعاب (Bifurcation ratio)
			پارامترهای سطحی (Areal Parameters)
-	-	A	مساحت حوضه (Basin area)
Horton, 1945	-	L_b	طول حوضه (Basin length)
-	-	P	محیط حوضه (Basin perimeter)
Horton, 1945	Ff = A/Lb2	F_f	فاکتور شکل (Form factor)
Horton, 1945	DD=∑LU/A	D_d	تراکم زهکشی (Drainage density)
Horton, 1945	$4\times3.14\ A/P^2$	R_c	نسبت گردی (Circularity ratio)
Horton, 1945	$1.128\sqrt{A} / Lb$	R_e	نسبت کشیدگی (Elongation ratio)
Horton, 1945	T= Dd × Fs	T_r	نسبت بافت (Texture ratio)
Horton, 1945	Fs = ΣNu / A	F_s	فراوانی آبراهه (Stream frequency)
Horton, 1945	$B_s = L_b^2/A$	B_s	شاخص شکل (Shape index)
Schumm, 1956	C= 1/Dd	C	ثابت نگه داشت آبراهه (Constant of channel maintenance)
			پارامترهای برجستگی (Relief Characteristics)
Schumm, 1956	R = H− h*	Bh	برجستگی حوضه (Basin relief)
Schumm, 1956	Rr = Bh/Lb	R_r	نسبت برجستگی (Relief ratio)
Schumm, 1956	Rn = Dd× H/1000	R_n	عدد برجستگی (Ruggedness number)

*Nu: تعداد آبراهه هر رتبه، H: ارتفاع حداکثر حوضه، h: ارتفاع حداقل حوضه

۲-۳-۱- روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP):

در این روش برای استخراج اولویت‌های نسبی در مقیاس‌های مطلق از مقایسه‌های زوجی گسسته و پیوسته در ساختارهای سلسله مراتبی چندسطحی استفاده می‌شود. در این پژوهش برای انجام تحلیل‌های مربوط به روش AHP از نرم‌افزار Expert Choice استفاده گردید. بعد از تعیین ارجحیت معیارها با استفاده از نظرات خبرگان، برای اطمینان از صحت تحلیل‌ها نسبت سازگاری مقایسات محاسبه گردید. سازگاری قضاوت ذهنی را می‌توان با تخمین نسبت سازگاری که مقایسه بین شاخص ثبات و شاخص سازگاری تصادفی است، بررسی کرد. برای تعیین نسبت سازگاری از رابطه (۱) استفاده شد.

$$CR = CI/RI \qquad (۱)$$

در این رابطه CR نسبت سازگاری،CI شاخص سازگاری و RI شاخص سازگاری تصادفی است. شاخص سازگاری، معیاری است برای سنجش سازگاری که با استفاده از رابطه (۲) به دست می‌آید:

$$CI = (\lambda_{max}-n)/(n-1) \qquad (۲)$$

در این رابطه λ_{max} بزرگ‌ترین مقدار ویژه به دست آمده از ماتریس است و n اندازه ماتریس مقایسه است. نرخ سازگاری کمتر از ۰/۱ بود دلالت بر صحت مقایسات دارد. بعد از انجام مقایسات زوجی و مشخص نمودن شاخص سازگاری امتیاز هر یک از شاخص‌ها مشخص و با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS10.5 هر لایه در وزن مربوطه ضرب شد. سپس لایه‌ها ادغام شد و نقشه سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها تهیه گردید.

۲ -۳-۲ روش ANP

این روش بر اساس نتایج حاصل از محاسبات وزنی– نسبی به وجود آمده که در مشخص نمودن و اختصاص دادن منابع بر این مورداستفاده قرار می‌گیرد. روش تحلیل شبکه با استفاده از شبکه‌ای از معیارها، گزینه‌ها و گروه‌های درون خوشه‌ها، عملیات مدل‌سازی مسائل را انجام می‌دهد. در این روش تمام عناصر موجود در شبکه قادر می‌باشند به هر طریقی با یکدیگر ارتباط برقرار کرده و شبکه قادر است بازخوردها و وابستگی بین و درون خوشه‌ها را با هم ترکیب کند. روش تحلیل شبکه قادر است به‌عنوان یک کنترل سلسله مراتبی ایجاد

شود. در این پژوهش برای انجام تحلیل‌های روش ANP از نرم‌افزار Super Decisions استفاده گردید. مراحل روش ANP به شرح ذیل است:

مرحله اول: تعیین ساختار شبکه‌ای مسئله تصمیم‌گیری: در این مرحله هدف اصلی ارائه تعریفی روشن از مسئله و تبدیل آن به یک ساختار شبکه‌ای مرتبط است. درخت سلسله مراتبی شامل هدف، شاخص‌ها و گزینه‌ها است که به هرکدام از اجزای درخت سلسله‌مراتب، خوشه گفته می‌شود و هرکدام از این خوشه‌ها از عناصری تشکیل شده‌اند. در واقع یک شبکه تصمیم‌گیری از مجموعه‌ای از خوشه‌ها، عناصر و ارتباطات میان آن‌ها تشکیل می‌شود.

مرحله دوم: مقایسه زوجی معیارها: این مرحله همانند روش AHP بوده و در این پژوهش همانند روش AHP عمل گردید و معیارها با یکدیگر مقایسه گردید.

مرحله سوم: محاسبه وزن نهایی: برای محاسبه وزن شاخص‌ها از دو روش استفاده می‌شود. روش گام‌به‌گام و روش سوپرماتریس در روش گام‌به‌گام با توجه به اینکه وزن شاخص‌ها در دو ماتریس جداگانه شامل ماتریس وزن شاخص‌ها نسبت به هدف (W_{21}) و ماتریس وزن شاخص‌ها نسبت به شاخص‌های دیگر (W_{22}) محاسبه می‌شود، جهت تعیین وزن شاخص‌ها باید این دو ماتریس را ترکیب کرد.

روش دوم روش سوپر ماتریس است. یک سوپرماتریس در حقیقت یک ماتریس جزءبندی شده است که در آن هر بخش از ماتریس، رابطه بین دو سطح تصمیم‌گیری را در کل مسئله تصمیم‌گیری نشان می‌دهد. رابطه (۳) سوپرماتریس استاندارد ارائه شده توسط ساعتی و وارگاس (Saaty & Vargas, 2006) را نشان می‌دهد. در این سوپر ماتریس C بیانگر خوشه‌ها و e عناصر درون گروه‌ها است. بردارهای W درون ماتریس نیز بردارهای وزنی حاصل از مقایسات زوجی عناصر خوشه‌ها با یکدیگر است. تمام روابط و تعاملات بین عناصر سطوح تصمیم‌گیری به‌وسیله مقایسات زوجی در روش سوپرماتریس ارزشیابی می‌شود (Mir Ghafouri, Asadian Ardakani & Azizi, 2013).

$$W=\begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} & . & . & . & W_{1N} \\ W_{21} & W_{22} & . & . & . & W_{12N} \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . \\ W_{N1} & W_{N2} & . & . & . & W_{NN} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

مرحله چهارم: تلفیق لایه‌ها و تهیه نقشه نهایی: بعد از محاسبه وزن هر شاخص لایه مربوطه تهیه و با تلفیق لایه‌ها نقشه نهایی سیل‌خیزی برای تمام حوضه‌ها تهیه گردید.

۲ -۳-۳- روش تاپسیس (TOPSIS)

این روش یکی از پرکاربردترین مدل‌های جبرانی تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است که در سال ۱۹۸۰ توسط یون ارائه گردید و سپس توسط یون و وانگ[۱] در سال ۱۹۸۱ برای یک مسئله چند شاخصه با n شاخص و m گزینه توسعه داده شد. نکته متمایز این روش نسبت به سایر روش‌ها، ایجاد جواب‌های ایده‌آل به دو صورت ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی در فضای اقلیدسی است. مراحل انجام تاپسیس در این پژوهش به‌صورت زیر است که در نرم‌افزار Super Decisions انجام شد:

مرحله اول: محاسبه ماتریس تصمیم‌گیری نرمال شده با رابطه (۴)

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt[2]{\sum_{i=1}^{xij} x_{ij}^2}} \quad (۴)$$

در رابطه (۴) Xij: نشان‌دهنده ارزش گزینه i ام با توجه با شاخص j ام است.

مرحله دوم: محاسبه ماتریس نرمال شده موزون با رابطه (۵)

$$v_{ij} = w_j \times n_{ij} \quad (۵)$$

که در رابطه (۵) w_j وزن هر معیار و n_{ij} ماتریس نرمال شده عناصر است.

مرحله سوم: تعیین مجموعه جواب ایده‌آل مثبت (A^+) و مجموعه جواب ایده‌آل منفی (A^-) شاخص‌ها

[۱] Yoon and wang

$$A^{+}=\{(max r_{ij} \mid j \in C_{b}), (min r_{ji} \mid i \in C_{c}) \mid i = 1,2, \dots, m\} = (v_{1}^{+}, v_{2}^{+}, \dots v_{m}^{+})$$ (۶)

$$A^{-}=\{(max r_{ij} \mid j \in C_{b}), (min r_{ji} \mid i \in C_{c}) \mid i = 1,2, \dots, m\} = (v_{1}^{-}, v_{2}^{-}, \dots v_{m}^{-})$$ (۷)

در رابطه‌های (۶) و (۷) C_b و C_c به ترتیب بیانگر مجموعه شاخص‌های مثبت و منفی می‌باشند. $v_1^+, v_2^+, \dots v_m^+$ مقادیر داده‌های استاندارد شده است.

مرحله چهارم: محاسبه فاصله گزینه‌ها از مقادیر راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت (S^+_i) و منفی (S^-_i)، در این مرحله با استفاده از رابطه‌های (۸) و (۹) فاصله هر شاخص از ایده‌آل مثبت و منفی محاسبه گردید.

$$S^{+}_{i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_{i}^{+} - v_{ij})^{2}} \qquad j = 1,2, \dots ,m$$ (۸)

$$S^{-}_{i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(v_{i}^{-} - v_{ij})^{2}} \qquad j = 1,2, \dots ,m$$ (۹)

در رابطه (۸) و (۹) v_i^+ و v_i^- به ترتیب ارزش حداکثر و ارزش حداقل در هر یک از نقشه‌های استاندارد شده است.

مرحله پنجم: محاسبه ضریب نزدیکی نسبی گزینه‌ها به مقدار ایده‌آل، در این مرحله با استفاده از رابطه (۱۰) ضریب نزدیکی گزینه‌ها به مقدار ایده‌آل محاسبه گردید.

$$C_{i} = \frac{S_{i}^{+}}{S_{i}^{+}+S_{i}^{-}} \qquad i = 1,2, \dots ,m$$ (۱۰)

۲-۳-۴- روش ویکور (VIKOR)

این روش را نخستین بار اپریکویک در سال ۱۹۷۹ معرفی کرد که بر انتخاب و رتبه‌بندی گزینه‌های جایگزین از معیارهای متضاد تأکید داشت (Mardani, Zavadskas, Govindan, Amat Senin & Jusoh, 2016). این روش، رتبه‌بندی چند معیاره را بر اساس معیار خاص نزدیک به راه‌حل ایده‌آل انجام می‌دهد (Opricovic & Tzeng, 2007). در این روش پس از تشکیل ماتریس تصمیم و نرمال‌سازی مراحل زیر انجام می‌شود:

مرحله اول: تعیین بهترین نقطه ایده‌آل مثبت ($f^{+}{}_{i}$)و منفی معیارها ($f^{-}{}_{i}$: که ایده آل مثبت برای معیارهای مثبت برابر با بزرگ‌ترین مقدار ستون معیار و ایده‌آل منفی کوچک‌ترین مقدار ستون معیار است و برای معیارهای منفی عکس این حالت است.

مرحله دوم: محاسبه مقادیر S_j (سودمندی) و R_j (تأسف).: مقدار سودمندی (S) بیانگر فاصله نسبی گزینه i ام از نقطه ایده‌آل و مقدار تأسف (R) بیانگر حداکثر ناراحتی گزینه i ام از دوری از نقطه ایده‌آل است. برای این منظور از رابطه (۱۱) و رابطه (۱۲) استفاده می‌شود.

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} Wi \frac{f_j^{+} - f_{ij}}{f_j^{+} - f_j^{-}} \quad (۱۱)$$

$$R_j = \max\left[W_i \frac{f_j^{+} - f_{ij}}{f_j^{+} - f_j^{-}}\right] \quad (۱۲)$$

مرحله سوم: تعیین شاخص ویکور (Q): مقدار شاخص ویکور از رابطه (۱۳) به دست می‌آید.

$$Q = V \frac{S_j - S^{+}}{S^{-} - S^{+}} + (1 - V) \frac{R_j - R^{+}}{R^{-} - R^{+}} \quad (۱۳)$$

V در این رابطه وزنی است که معمولاً برابر با ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. بر اساس روش ویکور بهترین گزینه، گزینه‌ای است که کمترین مقدار Q را دارا باشد.

۲-۳-۵ - روش الکتره (ELECTRE)

این روش برای اولین بار توسط برنارد روی[1] در اواسط سال ۱۹۶۰ ارائه شد که در آن گزینه‌ها بر اساس مفهوم روابط برتری با یکدیگر مقایسه می‌شوند. روش الکتره ازجمله تکنیک‌های مشهور در تئوری تصمیم-گیری هستند که با هدف انتخاب، طبقه‌بندی و رتبه‌بندی گزینه‌ها معرفی شده‌اند (Zare & Zamzam, 2022). برای انجام این روش مراحل زیر طی شده است:

مرحله اول: بی مقیاس سازی ماتریس تشکیل شده، که در این مطالعه از روش نرم اقلیدسی استفاده گردید (رابطه ۱۴).

---

[1] Bernard Roy

$$n_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_1^m x_{ij}^2}} \qquad (۱۴)$$

مرحله دوم: تعیین وزن معیارها: در این مرحله با توجه به ضرایب اهمیت معیارها در تصمیم‌گیری، بردار ضریب اهمیت معیارها تعیین گردید. برای تعیین وزن هر یک از معیارها در این پژوهش از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شد.

$$V_{ij} = W_j * N_{ij} \qquad j=1,2,\ldots,n\ ;\ i=1,2,\ldots,m \qquad (۱۵)$$

مرحله سوم: تشکیل ماتریس هماهنگ و ناهماهنگ: در این مرحله تمام معیارهای موردمطالعه در هر زیرحوضه با زیرحوضه‌های دیگر مقایسه شد و ماتریس هماهنگ و ناهماهنگ با استفاده از روابط (۱۶ و ۱۷) محاسبه گردید.

$$\text{ماتریس هماهنگ} = \begin{bmatrix} j \mid V_{kj} \geq V_{1j} \mid \in J^+ \\ j \mid V_{kj} < V_{1j} \mid \in J^- \end{bmatrix} \qquad (۱۶)$$

$$\text{ماتریس ناهماهنگ} = \begin{bmatrix} j \mid V_{kj} < V_{1j} \mid \in J^+ \\ j \mid V_{kj} \geq V_{1j} \mid \in J^- \end{bmatrix} \qquad (۱۷)$$

مرحله چهارم: تشکیل ماتریس هماهنگ مؤثر (F) و ناهماهنگ مؤثر (G): برای ایجاد ماتریس هماهنگ مؤثر ابتدا یک مقدار آستانه تعیین گردید، در مرحله بعد هر عنصر ماتریس I که بزرگ‌تر یا مساوی این مقدار آستانه بود در ماتریس F مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر تعلق گرفت. یک روش عمومی برای تعیین مقدار آستانه استفاده از میانگین مقادیر ماتریس است که از روابط (۱۸ و ۱۹) حاصل می‌شود.

$$\bar{I} = \sum_{k=1}^{m} \sum_{1=1}^{m} \frac{I_{k1}}{m(m-1)} \qquad (۱۸)$$

$$F_{k1} = \begin{cases} 0 & I_{k1} < \bar{I} \\ 1 & I_{k1} \geq \bar{I} \end{cases} \qquad (۱۹)$$

برای ایجاد ماتریس ناهماهنگ مؤثر (G) بر خلاف ماتریس مؤثر هماهنگ هر عنصری که از مقدار آستانه (NI) بیشتر بود صفر و هر عنصری که مقدار آن کمتر یا مساوی آستانه بود مقدار یک گرفت.

$$\overline{NI}= \sum_{k=1}^{m} \sum_{1=1}^{m} \frac{\overline{NI}_{k1}}{m(m-1)} \quad (۲۰)$$

$$G_{k1} = \begin{cases} 0 & N\,I_{k1} < \overline{NI} \\ 1 & NI_{k1} \geq \overline{NI} \end{cases} \quad (۲۱)$$

مرحله پنجم: تشکیل ماتریس جامع مؤثر (H)، در این مرحله ماتریس هماهنگ مؤثر در ماتریس ناهماهنگ مؤثر ضرب شد و حاصل آن ماتریس جدیدی به نام ماتریس هماهنگ مؤثر است (رابطه ۲۲).

$$H_{kI} = F_{kI} \times G_{k}I \quad (۲۲)$$

ماتریس جامع مؤثر نشان‌دهنده ترتیب ارجحیت‌های نسبی از گزینه‌ها است و این ماتریس برای رتبه‌بندی و گروه‌بندی حوضه‌های آبخیز مورداستفاده قرار گرفت.

۲-۴-اعتبارسنجی مدل‌ها

برای اعتبارسنجی مدل‌ها از روش بررسی درصد تغییرات و نقاط مشاهده‌ای یا همان نقاط سیل‌خیز ثبت شده در منطقه استفاده گردید. برای بررسی درصد تغییرات، نتایج حاصل از طبقه‌بندی زیرحوضه‌ها در روش‌های موردمطالعه دو به دو مقایسه شده و تعداد زیرحوضه‌هایی که در هر دو روش در طبقه یکسان قرار می‌گیرند محاسبه می‌گردد و بر اساس آن درصد تغییرات روش‌ها ارزیابی می‌شود. هر روش که کمترین درصد تغییرات را داشته باشد نتایج حاصل از آن معتبرتر خواهد بود (Sharifi kia, Shayan, Yamani & Arab Ameri, 2018).

برای محاسبه درصد تغییرات از رابطه (۲۳) استفاده شد.

$$\Delta P = \frac{N-N_{Constant}}{N} \times 100 \quad (۲۳)$$

در این رابطه ΔP درصد تغییرات در مقایسه دو روش، $N_{Constant}$ تعداد زیرحوضه‌هایی است که در مقایسه دو روش دارای رتبه ثابتی هستند و N تعداد کل زیرحوضه‌های موردمطالعه است. برای مقایسه با نقاط سیل‌خیز، از سیلاب‌های ثبت شده در حوضه که توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان خراسان رضوی تهیه گردیده، استفاده شد. بدین منظور از روش همبستگی اسپیرمن که یک روش بررسی همبستگی رتبه‌ای است، استفاده گردید. بر این اساس زیرحوضه‌ها رتبه‌بندی شده و با نتایج روش‌های AHP، ANP، TOPSIS،

VIKOR و ELECTRE مقایسه و همبستگی آن‌ها با روش همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن در نرم‌افزار SPSS محاسبه گردید.

۳-نتایج و بحث

۳-۱-نتایج محاسبه پارامترهای مورفومتریک حوضه

معیارهای موردنیاز در این پژوهش، خصوصیات مورفومتری حوضه‌ها بوده است برای ۲۰ زیرحوضه موردمطالعه که در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- خصوصیات مورفومتری زیرحوضه‌های موردمطالعه

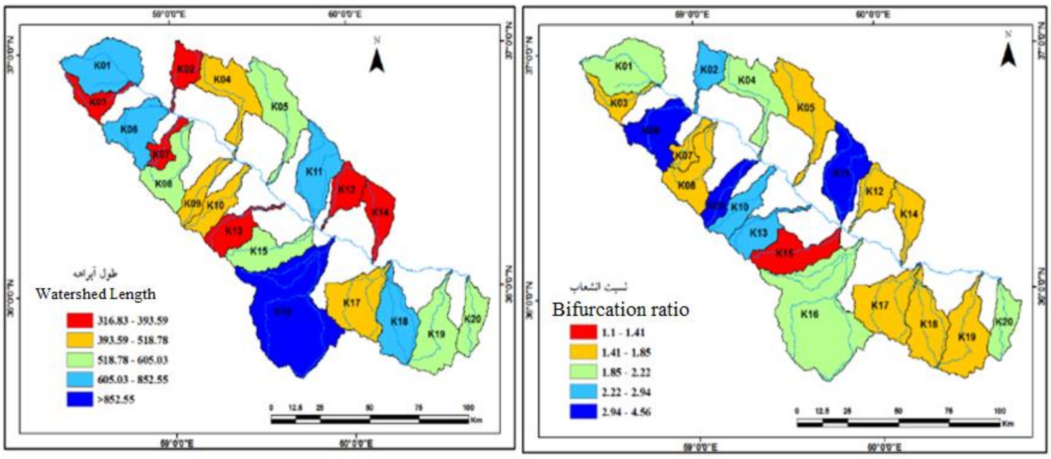
Table 2- Morphometric characteristics of the studied sub-basins

R_n	R_r	Bh	C	B_s	F_s	T_r	R_e	R_c	D_d	F_f	P	L_b	A	R_b	Lu	زیرحوضه Subbbasin
0.47	23.3	1317	0.85	4.45	0.96	1.23	0.53	0.31	1.18	0.22	171.4	56.5	716.7	2.02	852.6	K01
0.44	35.5	1716	0.79	9.01	1.95	0.65	0.38	0.18	1.26	0.11	139.4	48.3	258.9	2.94	325.2	K02
0.64	21.9	1258	0.63	14.35	2.32	0.68	0.3	0.12	1.58	0.07	157.1	57.4	229.5	1.69	363.5	K03
0.29	27.2	2060	1.1	10.01	0.95	0.95	0.36	0.13	0.9	0.01	237.2	75.8	573.9	1.99	518.8	K04
0.29	14.0	1196	1.18	10.76	0.8	1.06	0.34	0.16	0.85	0.09	233.9	85.5	679.4	1.74	577.5	K05
0.46	31.7	1750	0.75	5.7	1.62	0.82	0.47	0.2	1.33	0.08	184.5	55.3	536.2	4.56	715.2	K06
0.72	30.6	1385	0.56	11.69	3.48	0.51	0.33	0.14	1.8	0.09	123.6	45.3	175.6	1.82	316.8	K07
0.39	30.7	2019	0.82	9.1	1.34	0.91	0.37	0.18	1.22	0.11	182.2	65.7	474.3	1.8	577.1	K08
0.54	44.9	2247	0.54	9.01	3.18	0.58	0.38	0.21	1.86	0.11	130.9	50	277.4	4.53	515.0	K09
0.45	40.3	2231	0.68	9.1	2.05	0.72	0.37	0.18	1.47	0.11	153.3	55.3	335.9	2.67	492.0	K10
0.53	22.6	1538	0.78	8.02	1.62	0.79	0.4	0.26	1.28	0.12	167.3	68.1	577.9	3.96	737.5	K11
0.69	23.8	1049	0.75	6.54	1.56	0.85	0.44	0.22	1.33	0.15	131.1	44	295.8	1.84	393.6	K12
0.35	37.2	2127	0.94	9.26	1.36	0.78	0.37	0.15	1.06	0.11	171.5	57.2	353.3	2.76	373.5	K13
0.59	23.0	1170	0.86	7.97	1.52	0.76	0.4	0.22	1.16	0.13	136.5	50.9	325.1	1.74	377.1	K14
0.45	29.0	1766	0.83	7.36	1.24	0.97	0.42	0.28	1.2	0.14	180	61	505.6	1.41	605.0	K15

0.7	18.9	1732	0.55	4.65	2.56	0.71	0.52	0.21	1.83	0.22	328.3	91.5	180.1	1.99	329.8	K16
0.55	21.9	1259	0.89	4.82	0.82	1.37	0.51	0.27	1.12	0.21	178.8	57.4	683.4	1.85	766.7	K17
0.35	23.7	1408	1.04	6.08	0.89	1.08	0.46	0.24	0.96	0.16	176.1	59.7	586.4	1.63	561.7	K18
0.45	18.4	1392	1.09	8.73	0.8	1.15	0.38	0.22	0.92	0.11	191.3	75.5	652.8	2.223	599.0	K19
0.76	21.9	1066	0.77	7.25	1.51	0.86	0.42	0.25	1.3	0.14	128.4	48.6	325.6	1.81	424.0	K20

۳-۱-۱-پارامترهای خطی

پارامترهای خطی منتخب در این پژوهش شامل طول آبراهه و نسبت انشعاب است. ازآنجاکه طول آبراهه با تعداد آبراهه رابطه مستقیمی دارد حوضه‌هایی که آبراهه طولانی‌تری دارند معمولاً در هنگام وقوع طوفان‌های بارانی نسبت به حوضه‌های با طول آبراهه کم، باعث رواناب زیاد و جریان اوج سریع می‌شوند (Bhat, 2019). نتایج نشان داد بیشترین طول آبراهه به دست آمده مربوط به زیرحوضه‌های K16 برابر با ۳۲۹۵/۸۳ کیلومتر و زیرحوضه K01 برابر با ۸۵۲/۵۵ کیلومتر و کمترین طول به دست آمده مربوط به زیرحوضه K07 برابر با ۳۱۶/۸۳ کیلومتر است. در مورد نسبت انشعاب نیز باید گفت که مقدار بالای نسبت انشعاب در زیرحوضه نشان می‌دهد که پتانسیل تولید رواناب در آن بالا است و پتانسیل بالایی برای تولید سیلاب ناگهانی در طی باران‌های سیل‌آسا را دارد. بیشترین میزان نسبت انشعاب نیز مربوط به زیرحوضه K06 برابر با ۴/۵۶ و کمترین آن مربوط به زیرحوضه K15 برابر با ۱/۴۱ است.



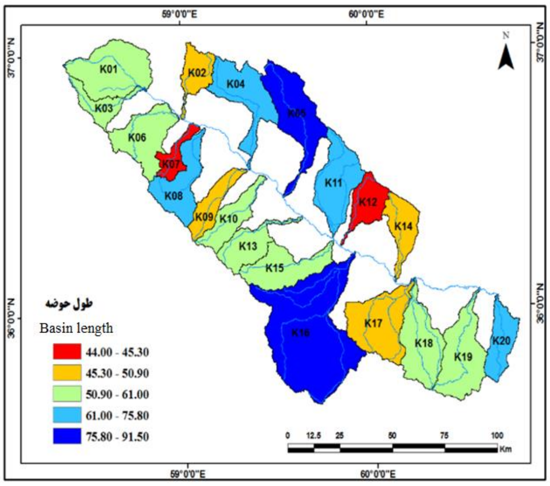
شکل ۲- فاکتورهای خطی حوضه‌های موردمطالعه

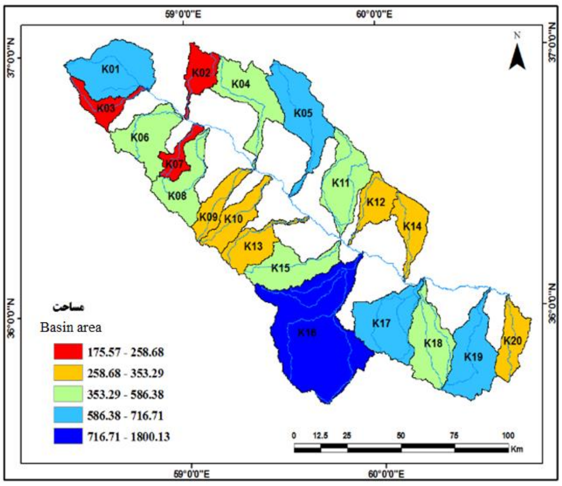
Fig.2. Linear factors of the studied basins

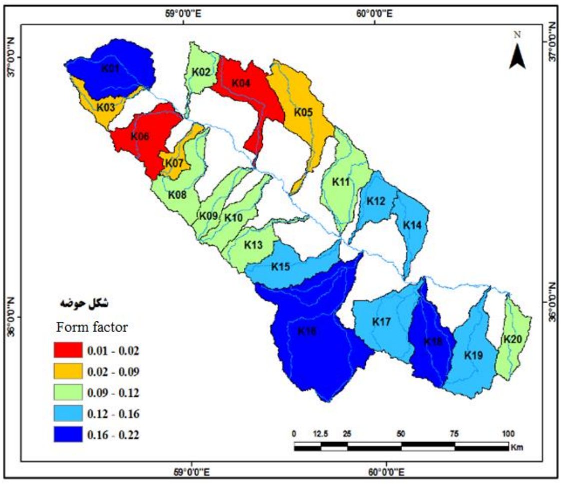
۳-۱-۲-پارامترهای سطحی

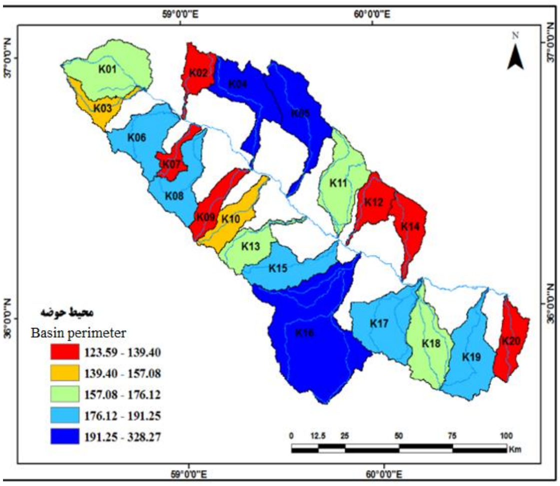
از میان پارامترهای سطحی موردمطالعه، عامل مساحت از فاکتورهای بسیار مهم در سیل‌خیزی یک حوضه آبخیز است. بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط هورتون (Horton, 1945) حوضه‌های با مساحت بیش از ۱۰۰ کیلومترمربع در طبقه حوضه‌های بزرگ قرار می‌گیرند. مساحت زیرحوضه‌ها از ۱۷۵/۶ کیلومترمربع در زیرحوضه K07 تا ۳۲۹۵/۸۳ کیلومترمربع در زیر حوضه K16، متغیر است در نتیجه تمامی زیرحوضه‌های مطالعاتی در طبقه حوضه‌های بزرگ قرار دارند. پارامتر طول حوضه تعیین‌کننده زمان حرکت رواناب به‌ویژه سیلاب در داخل حوضه است؛ بدین معنی که در زیرحوضه‌های با طول بیشتر رواناب زمان بیشتری را برای رسیدن به خروجی حوضه طی می‌نماید. همچنین حوضه‌های با طول بیشتر پتانسیل بیشتری برای تغذیه آب‌های زیرزمینی دارند. مقدار این پارامتر در زیرحوضه‌های موردمطالعه از ۴۸/۶ کیلومتر در زیرحوضه K20 تا ۹۱/۵ کیلومتر در زیرحوضه K16 متغیر است. فاکتور محیط حوضه (P) در ارتباط مستقیم با مساحت حوضه و طول حوضه است. این فاکتور به همراه مساحت و طول حوضه از پارامترهای اساسی اثرگذار بر رفتار هیدرولوژیکی حوضه می‌باشند. در بین زیرحوضه‌های موردمطالعه بیشترین محیط مربوط به زیرحوضه K16 با مقدار ۳۲۸/۳ کیلومتر است. کمترین مقدار نیز مربوط به زیرحوضه K14 برابر با ۱۳۶/۵ کیلومتر است. فاکتور شکل (Ff) پارامتری است که می‌توان برای پیش‌بینی شدت‌جریان زیرحوضه‌ها از آن استفاده نمود. به این صورت که زیرحوضه‌های دارای مقادیر بالای فاکتور شکل دارای دبی زیاد در مدت‌زمان کوتاه می‌باشند و در زیرحوضه‌های با مقادیر کم برعکس این قضیه صدق می‌کند. توزیع فاکتور شکل در زیرحوضه‌های موردمطالعه نشان می‌دهد که زیرحوضه‌های K01 و K16 با مقدار ۰/۲۲ بیشترین مقدار فاکتور شکل را دارا می‌باشند. تراکم بالای زهکشی (D) یک شاخص مهم برای حجم بالای رواناب و پیک‌های سریع سیل است (Horton, 1945). تراکم زهکشی بالا اغلب با خاک‌های نفوذناپذیر، پوشش گیاهی کم و زمین‌های کوهستانی همراه است. بیشترین مقدار پارامتر تراکم زهکشی در زیرحوضه‌های موردمطالعه، مربوط به زیرحوضه K09 با مقدار ۱/۸۶ و K16 با ۱/۸۳ است، نسبت گردی متأثر از سایر ویژگی‌های حوضه مانند تراکم زهکشی، ناهمواری زمین، برجستگی حوضه، شیب حوضه و پوشش گیاهی حوضه است. مقدار این فاکتور بین صفرتا ۱ قرار دارد. هر چه به یک نزدیک‌تر باشد شکل حوضه دایره‌ای و دارای پتانسیل سیل‌خیزی

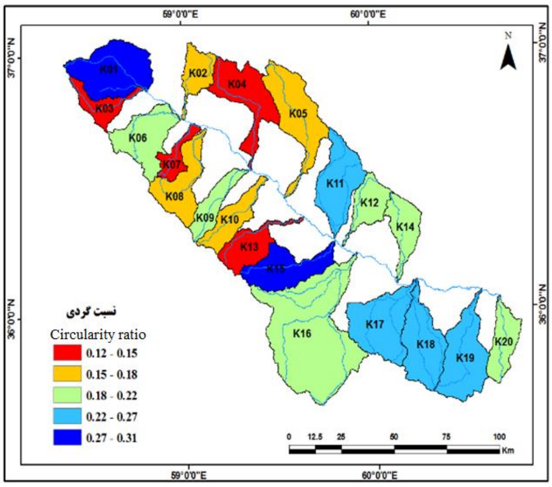
بیشتری خواهد بود (Bisht, Chaudhry, Sharma & Soni, 2018). زیرحوضه K01 با مقدار ۰/۳۱ بیشترین مقدار نسبت گردی را دارا بوده و زیرحوضه K03 با مقدار ۰/۱۳ کمترین مقدار را دارد. نسبت کشیدگی پارامتر مهمی برای تحلیل شکل حوضه‌آبخیز است. مقدار این فاکتور نحوه شکل‌گیری سیلاب، درجه فرسایش و رسوب‌دهی حوضه را نشان می‌دهد. بیشترین مقدار نسبت کشیدگی برابر با ۰/۵۳ مربوط به زیرحوضه K01 و کمترین آن برابر با ۰/۳ مربوط به زیرحوضه K03 است. شاخص نسبت بافت (T) رابطه مستقیمی با ناهمواری، پوشش گیاهی و وضعیت خاک منطقه دارد (Smith,1950). مقدار بالای نسبت بافت نشان‌دهنده سیل‌خیزتر بودن زیرحوضه است. بیشترین مقدار پارامتر نسبت بافت (T) ۱/۳۷ مربوط به زیرحوضه K17 بود و کمترین آن برابر با ۰/۵۱ مربوط به زیرحوضه K07 است. مناطق با شیب‌های تند و ظرفیت نفوذ کم که معمولاً با فراوانی آبراهه بالا همراه است، جریان سطحی و پتانسیل سیل بیشتر را تسهیل می‌کند. مقدار فراوانی آبراهه از ۰/۸ برای زیرحوضه‌های K05 و K19 به‌عنوان کمترین مقدار تا ۳/۴۸ به‌عنوان بیشترین مقدار برای زیرحوضه K07 متغیر است. شاخص شکل حوضه (Bs) فاکتوری مؤثر در دبی سیلاب زیرحوضه‌ها است. هر چه مقدار این پارامتر بیشتر باشد نشان‌دهنده دبی اوج سیلاب کمتر خواهد بود. بیشترین مقدار این پارامتر شاخص شکل (Bs) مربوط به زیرحوضه K03 برابر با ۱۴/۳۵ است و کمترین مقدار آن مربوط به زیرحوضه K01 برابر با ۴/۴۵ است. ثابت نگه داشت حوضه (C) نه‌تنها به نوع سنگ و نفوذپذیری، شرایط اقلیمی، پوشش گیاهی و برجستگی بستگی دارد، بلکه همچنین وابسته به مدت‌زمان فرسایش و اقلیم دیرینه حوضه است (Chandrashekar, Lokesh, Sameena & Ranganna, 2015). مقدار کم این شاخص نشان می‌دهد حوضه دارای خاک‌های با مقاومت کم، پوشش گیاهی ضعیف و ناهموار است و اعداد بالا این شاخص نشان‌دهنده وجود خاک‌های مقاوم با پوشش گیاهی مناسب و زمین‌های هموار است. ثابت نگهداشت زیرحوضه بین ۰/۵۴ تا ۱/۱۸ متغیر است که بیشترین آن مربوط به زیرحوضه K05 و کمترین آن ۰/۵۴ مربوط به زیرحوضه K09 است.

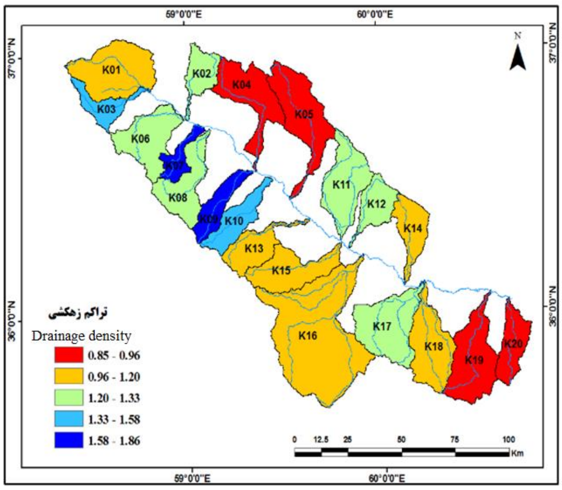

طول حوضه
Basin length
44.00 - 45.30
45.30 - 50.90
50.90 - 61.00
61.00 - 75.80
75.80 - 91.50
0 12.5 25 50 75 100 Km
59°0'0"E
60°0'0"E
37°0'0"N
36°0'0"N

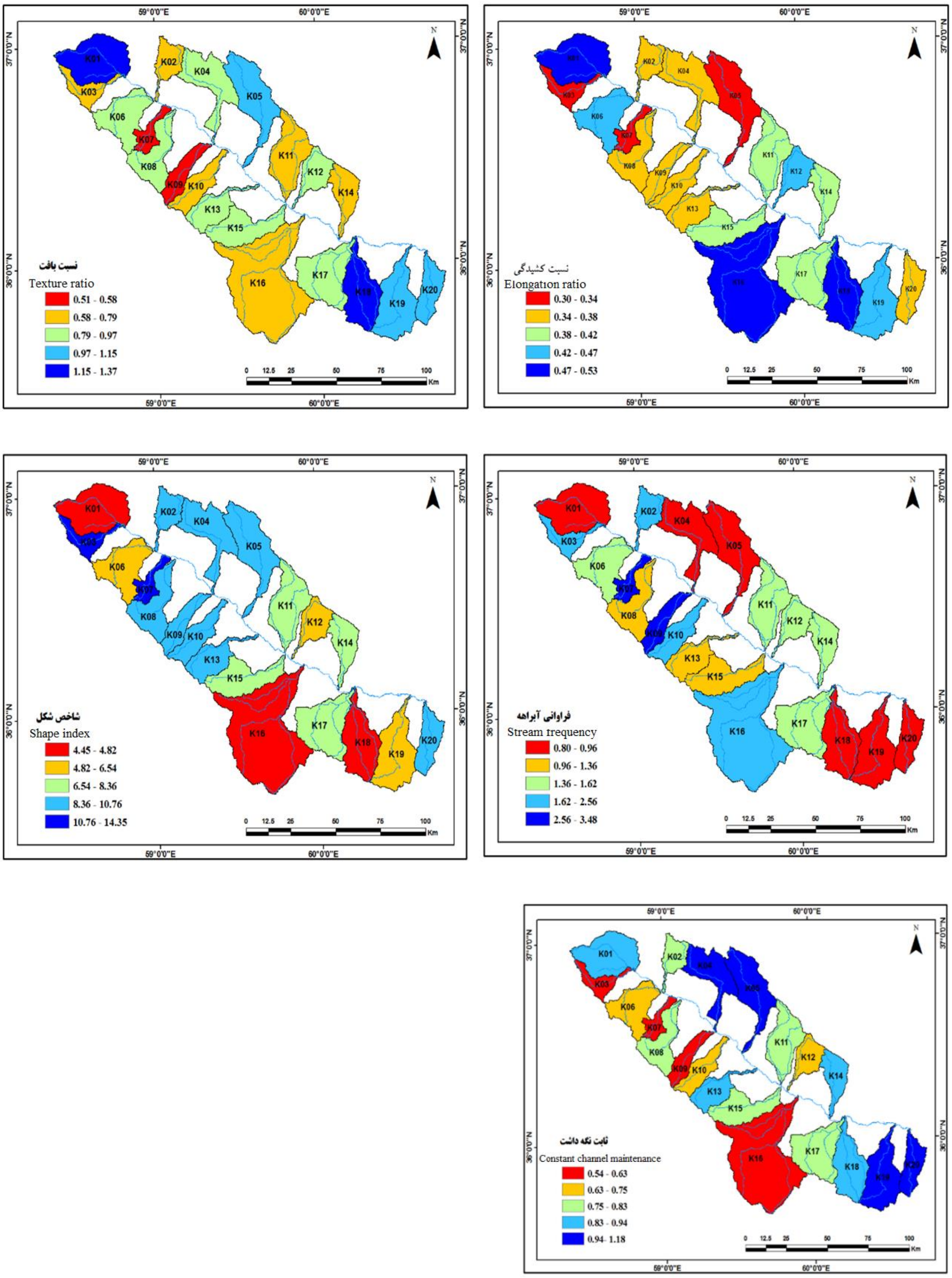

مساحت
Basin area
175.57 - 258.68
258.68 - 353.29
353.29 - 586.38
586.38 - 716.71
716.71 - 1800.13
0 12.5 25 50 75 100 Km
59°0'0"E
60°0'0"E
37°0'0"N
36°0'0"N


شکل حوضه
Form factor
0.01 - 0.02
0.02 - 0.09
0.09 - 0.12
0.12 - 0.16
0.16 - 0.22
0 12.5 25 50 75 100 Km
59°0'0"E
60°0'0"E
37°0'0"N
36°0'0"N


محیط حوضه
Basin perimeter
123.59 - 139.40
139.40 - 157.08
157.08 - 176.12
176.12 - 191.25
191.25 - 328.27
0 12.5 25 50 75 100 Km
59°0'0"E
60°0'0"E
37°0'0"N
36°0'0"N


نسبت گردی
Circularity ratio
0.12 - 0.15
0.15 - 0.18
0.18 - 0.22
0.22 - 0.27
0.27 - 0.31
0 12.5 25 50 75 100 Km
59°0'0"E
60°0'0"E
37°0'0"N
36°0'0"N


تراکم زهکشی
Drainage density
0.85 - 0.96
0.96 - 1.20
1.20 - 1.33
1.33 - 1.58
1.58 - 1.86
0 12.5 25 50 75 100 Km
59°0'0"E
60°0'0"E
37°0'0"N
36°0'0"N

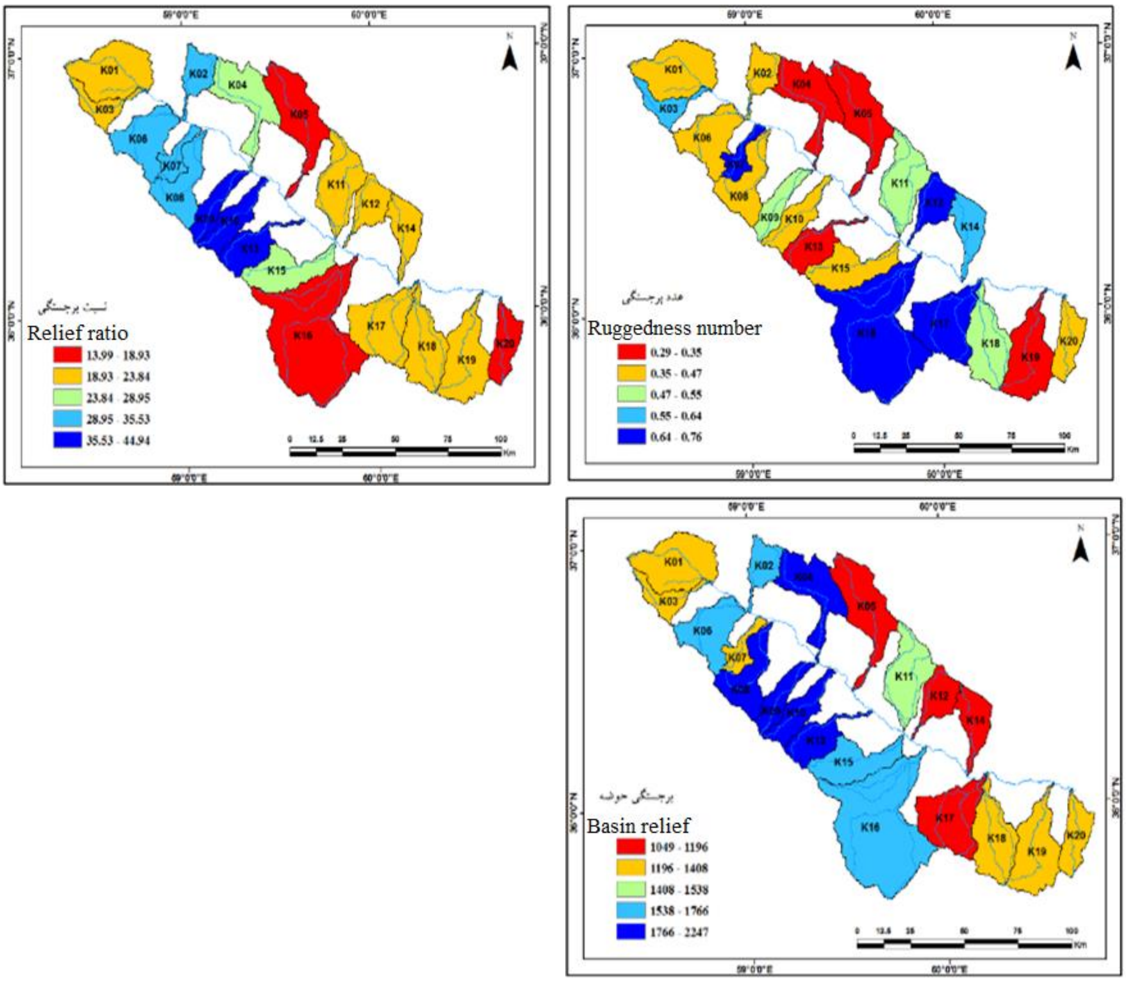


شکل ۳- پارامترهای سطحی زیرحوضه‌های موردمطالعه

Fig.3. Aerial parameters of the studied subbasins

۳-۱-۳ - پارامترهای برجستگی

پارامترهای برجستگی منتخب در این پژوهش شامل، برجستگی حوضه (Bh)، نسبت برجستگی (Rr) و عدد برجستگی (Rn) است. برجستگی حوضه (Bh)، شاخصی است که شیب، شیب آبراهه و همچنین تخلیه رواناب در حوضه را نشان می‌دهد. مقدار برجستگی زیرحوضه‌های موردمطالعه از ۲۲۴۷ تا ۱۰۴۹ متغیر است که بیشترین آن مربوط به زیرحوضه‌های K04، K09، K13، و کمترین آن مربوط به زیرحوضه‌های K05، K12، K14 و K17 است. زیرحوضه‌های با مقدار برجستگی بالا توانایی تولید سیلاب بیشتری نسبت به زیرحوضه‌های با مقدار برجستگی کم را دارا می‌باشند. پارامتر نسبت برجستگی (Rr) شاخصی جهت ارزیابی شدت سیل‌خیزی و فرسایش در یک حوضه استفاده نمود. مقادیر بالای این پارامتر نشان‌دهنده وجود مناطق ناهموار دارای شیب زیاد، سرعت جریان بالا و سیل‌خیز است. این شاخص همچنین امکان مقایسه زیرحوضه‌ها از لحاظ برجستگی و ناهمواری را بدون توجه به تفاوت در مقیاس توپوگرافی را می‌دهد. مقدار این شاخص از ۴۴/۹۴ در زیرحوضه K09 تا ۱۳/۹۹ برای زیرحوضه K05 متغیر است. بالا بودن مقدار عدد برجستگی حوضه (Rn)، در زیرحوضه نشان‌دهنده شیب زیاد بوده که می‌تواند منجر به سیلاب‌های ناگهانی گردد. مقدار شاخص عدد برجستگی از ۰/۲۹ که کمترین میزان آن است تا ۰/۷۶ که بیشترین میزان آن است متغیر بوده که بیشترین آن مربوط به زیرحوضه K20 و کمترین آن نیز مربوط به زیرحوضه‌های K04 و K05 است.



شکل ۴- پارامترهای برجستگی زیرحوضه‌های موردمطالعه

Fig.4. Relief parameters of the studied subbasins

۳-۴- مقایسه نتایج روش‌های مختلف تحلیل چند معیاره

قبل از انجام تحلیل‌ها با روش‌های مختلف وزن هر یک از پارامترها تعیین گردید. در جدول ۳، وزن هریک از پارامترها که به‌وسیله روش AHP تعیین گردیده ارائه شده است. بر این اساس معیار مساحت با وزن ۰/۱۸۸ دارای بیشترین وزن و معیار برجستگی حوضه با وزن ۰/۰۰۸ کم‌اهمیت‌ترین معیار بوده است. این یافته‌ها با نتایج تحقیقات پژوهشگرانی مانند چورلی و همکاران (Chorley, Malm & Pogorzelski, 1957) و السعدی و همکاران (Al-Saady, Al-Suhail, Al-Tawash & Othman, 2016) که عقیده دارند شاخص مساحت یک

شاخص اساسی و تعیین‌کننده در سیل‌خیزی حوضه‌های آبخیز هستند و تحقیقات افرادی مانند کریستوفر و همکاران (Christopher, Idowu & Olugbenga, 2010) و بیشت و همکاران (Bisht et al., 2018) که آبراهه را شاخصی اساسی در واکنش‌های هیدرولوژیکی آبخیز می‌دانند همخوانی دارد. همچنین نتایج تحلیل شاخص-های مورفولوژیک نشان می‌دهد این شاخص‌ها اهمیت زیادی در مطالعات سیل‌خیزی و پهنه‌بندی سیلاب در حوضه‌های آبخیز دارند که این امر در مطالعات افرادی مانند: الم و همکاران (Alam, Ahmed & Sammonds, 2021)، همدان (Hamdan, 2020) و مقیمی و همکاران (Moghimi, Mousavi Harami, Moatamed & Ahmadi, 2010) تأکید شده و این محققان بیان کرده‌اند که شاخص‌های مورفومتری دارای اهمیت اساسی در وقوع سیلاب در حوضه‌های آبخیز هستند.

جدول ۳- وزن هر یک از پارامترها بر اساس روش **AHP**

Table 3- The weight of each parameter based on the AHP method

وزن weight	پارامتر Parameter	علامت اختصاری پارامتر Acronym	ردیف Row
0.097	Stream length طول آبراهه	Lu	1
0.029	Bifurcation ratio نسبت انشعاب	R_b	2
0.188	Area مساحت	A	3
0.076	Basin length طول حوضه	L_b	4
0.058	Basin perimeter محیط حوضه	P	5
0.124	Form factor فاکتور شکل	F_f	6
0.034	Drainage density تراکم زهکشی	D_d	7
0.090	Circularity ratio نسبت گردی	R_c	8
0.052	Elongation ratio نسبت کشیدگی	R_e	9
0.020	Texture ratio نسبت بافت	T_r	10
0.034	Stream frequency فراوانی آبراهه	F_s	11
0.154	Shape index شاخص شکل	B_s	12
0.017	Constant of channel maintenance ثابت نگه داشت	C	13
0.012	Basin relief برجستگی حوضه	Bh	14
0.008	Relief ratio نسبت برجستگی	R_r	15
0.010	Ruggedness number عدد برجستگی	R_n	16

نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) نشان می‌دهد که از بین شاخص‌های موردمطالعه شاخص مساحت بیشترین وزن را در سیل‌خیزی حوضه دارد و شاخص نسبت برجستگی کمترین وزن را دارا می‌باشد. پس از تعیین امتیاز هر شاخص و تهیه لایه‌های شاخص‌ها با ضرب هر لایه در وزن آن و تلفیق لایه‌ها نقشه پهنه‌بندی حوضه‌ها به دست آمد و درنهایت حوضه‌ها در ۵ طبقه طبقه‌بندی گردید (جدول ۴). نتایج نشان داد که دو حوضه K01 و K16 که در طبقه خیلی زیاد قرار دارند، ۲۴/۳ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شود و پنج زیرحوضه K05، K06، K11، K18 و K19 که در طبقه زیاد قرار دارند، ۲۹/۳ درصد مساحت حوضه را در بر می‌گیرند؛ بنابراین ۵۳/۶ درصد حوضه در طبقه سیل‌خیزی زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرد.

جدول ۴- امتیاز AHP با طبقه اولویت‌های مختلف

Table 4- AHP score with different priority classes

درصد مساحت Area percent	نام حوضه Subbasin	طبقه اولویت Priority class	امتیاز اولویت Priority score	شماره طبقه Class number
9.2	K02,K03,K07,K12	خیلی کم	124.93 – 93.68	1
12.4	K09,K13,K14,K20	کم	151.37 – 124.93	2
24.8	K04,K08,K10,K15,K17	متوسط	206.65 – 151.37	3
29.3	K05.K06,K11,K18,K19	زیاد	247.51 – 206.65	4
24.3	K01,K16	خیلی زیاد	706.60 – 247.51	5

بر اساس نتایج تلفیق لایه‌ها در روش تحلیل شبکه (ANP) نیز حوضه‌ها در ۵ طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم و خیلی کم طبقه‌بندی شدند (جدول ۵). بر اساس تحلیل‌های این روش دو حوضه K01 و K16 در طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد قرار دارند که حدود ۲۴/۳ درصد مساحت حوضه را تشکیل می‌دهند و پنج زیرحوضه K05، K06، K11، K18، K19 در طبقه سیل‌خیزی زیاد قرار گرفته که ۲۵/۷ درصد از مساحت حوضه را شامل می‌شود. به‌طور کلی ۵۰ درصد از مساحت حوضه در طبقه سیل‌خیزی زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرد.

جدول ۵- امتیاز ANP با طبقه اولویت‌های مختلف

Table 5- ANP score with different priority classes

درصد مساحت Area percent	نام حوضه Subbasin	طبقه اولویت Priority class	امتیاز اولویت Priority score	شماره طبقه Class number
9.9	K03,K07,K12,K14	خیلی کم	124.03 – 150.91	1
12.3	K02,K17, K20	کم	150.91 – 186.73	2
27.8	K05,K09,K10,K13,K18,K19	متوسط	186.73 – 206.47	3
25.7	K04.K06,K11,K08,K15	زیاد	206.47 – 229.76	4
24.3	K01,K16	خیلی زیاد	229.76 – 580.99	5

بررسی نتایج روش تاپسیس شرایط متفاوتی با دو مدل AHP و ANP دارد. در این روش نیز زیرحوضه‌ها در ۵ طبقه سیل‌خیزی کم تا خیلی زیاد تقسیم شدند (جدول ۶). بر این اساس تنها یک زیرحوضه یعنی زیرحوضه K16 در طبقه خیلی‌زیاد قرار گرفته که ۱۷/۴ درصد مساحت حوضه را دربر می‌گیرد. پنج زیرحوضه K01، K05، K15، K18 و K19 در طبقه سیل‌خیزی زیاد قرار دارند که حدود ۳۰/۲ درصد از مساحت حوضه را در بر می‌گیرند بر اساس این روش، کمتر از ۵۰ درصد حوضه در شرایط سیلاب خیلی زیاد و زیاد قرار دارد.

جدول ۶- امتیاز TOPSIS با طبقه اولویت‌های مختلف

Table 6- TOPSIS score with different priority classes

درصد مساحت Area percent	نام حوضه Subbasin	طبقه اولویت Priority class	امتیاز اولویت Priority score	شماره طبقه Class number
9.1	K02,K03,K06,	خیلی کم	0.239 – 0.2580	1
12.2	K09,K10,K12,K13	کم	0.258001 – 0.2930	2
30.3	K04,K07,K08,K11,K14,K17,K20	متوسط	0.293001 –0.33200	3
30.3	K01,K05,K15,K18,K19	زیاد	0.332001 – 0.43300	4
18.4	K16	خیلی زیاد	0.433001 – 0.80100	5

براساس نتایج روش ویکور (جدول ۷) نیز حوضه‌ها در ۵ طبقه سیل‌خیزی طبقه‌بندی شدند. در این روش چهار زیرحوضه K05، K11، K16 و K20 در طبقه خیلی زیاد قرار گرفتند و پنج زیر حوضه K04، K06،

K15، K18 و K19 در طبقه سیل‌خیزی زیاد قرار گرفتند. بر این اساس ۳۶/۱ درصد از مساحت حوضه در طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد و ۲۵/۰۳ درصد از مساحت حوضه در طبقه سیل‌خیزی زیاد قرار می‌گیرد؛ بنابراین حدود ۶۲ درصد از مساحت حوضه در طبقه سیل‌خیزی زیاد و خیلی زیاد قرار می‌گیرد.

جدول ۷- امتیاز ویکور با طبقه اولویت‌های مختلف

Table 7- Vikor score with different priority classes

درصد مساحت Area percent	نام حوضه Subbasin	طبقه اولویت Priority class	امتیاز اولویت Priority score	شماره طبقه Class number
9.64	K02,K03,K07,K10	خیلی کم	0.852 – 0.983	1
17.74	K09,K12,K13,K14,K17	کم	0.623 – 0.852	2
11.49	K01,K08	متوسط	0.578 – 0.623	3
25.03	K04.K06,K15,K18,K19	زیاد	0.448 – 0.578	4
36.1	K05,K11,K16,K20	خیلی زیاد	0.258 – 0.448	5

نتایج روش الکتره نشان می‌دهد (جدول ۸) که سه زیرحوضه K15، K16 و K18 طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد و چهار زیرحوضه K01، K05، K11 و K19 در طبقه سیل‌خیزی زیاد قرار دارند. بر این اساس ۲۸/۵۵ درصد از مساحت حوضه در طبقه سیل‌خیزی خیلی زیاد و حدود ۲۲/۱۹ درصد از محدوده در طبقه سیل-خیزی زیاد قرار دارند.

جدول ۸- امتیاز الکتره با طبقه اولویت‌های مختلف

Table 8- Electere score with different priority classes

نام حوضه Subbasin	طبقه اولویت Priority class	امتیاز اولویت Priority score	شماره طبقه Class number
18.12	K02,K03,K06,K07,K113,K14	خیلی کم	1
14.43	K09,K10,K12, K17	کم	2
16.71	K04,K08,K20	متوسط	3
22.19	K01.K05,K11,K19	زیاد	4
28.55	K15,K16,K18	خیلی زیاد	5

۳-۵ - اعتبار سنجی روش‌ها

نتایج حاصل از بررسی درصد تغییرات در جدول (۹) نشان می‌دهد کمترین تغییرات مربوط به روش ANP است که برابر با ۲۵ درصد می‌باشد و بیشترین درصد تغییرات مربوط به روش AHP است.

جدول ۹- درصد تغییرات رتبه زیرحوضه‌ها در روش‌های مختلف

Table 9- The percentage of changes in the rank of sub-basins in different methods

میانگین درصد تغییرات Mean of percentage change	ELECTRE	VIKOR	TOPSIS	ANP	AHP	روش Method
41	50	55	55	45	0	AHP
25	30	35	15	0	45	ANP
37	65	50	0	15	55	TOPSIS
37	45	0	50	35	55	VIKOR
38	0	45	65	30	50	ELECTRE

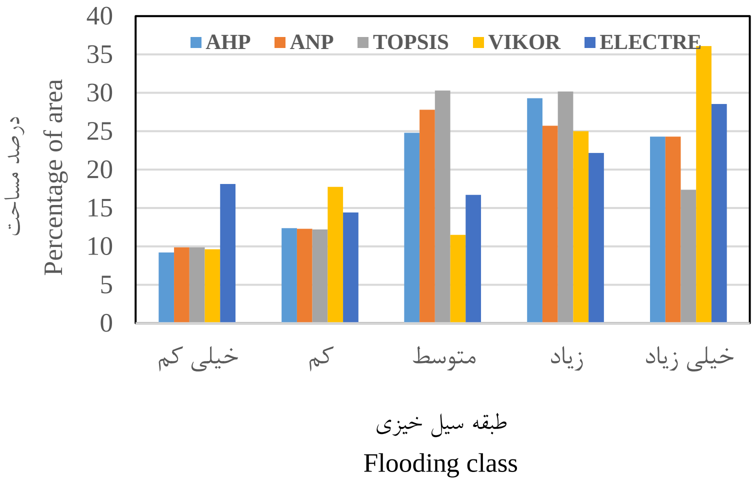
نتایج مقایسه نقاط وقوع سیلاب با نتایج مدل‌ها، نشان می‌دهد که روش ANP دارای بیشترین همبستگی با نقاط مشاهداتی در زیرحوضه‌ها دارد (۰/۸۳۸) و پس از آن روش AHP (۰/۶۷۱) بیشترین همبستگی را دارد و روش ELECTRE دارای کمترین همبستگی است (۰/۱۸۲)(جدول ۱۰). بر این اساس اخلاف معنی‌داری بین روش ANP، AHP و VIKOR با نقشه سیل‌خیزی حوضه بر اساس داده‌های مشاهداتی وجود ندارد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش‌هایی مانند ANP در بین سایر روش‌های مورداستفاده برای تحلیل وضعیت سیل‌خیزی حوضه با استفاده از شاخص‌های مورفومتری دارای نتایج بهتری است. این امر با نتایج د بریتو و همکاران (De Brito et al., 2018) که از تکنیک‌های چند معیاره برای نقشه‌برداری و ارزیابی خطر سیل در برزیل استفاده کردند هم‌خوانی دارد. آن‌ها مشاهده کردند که ANP به دلیل وابستگی بین معیارها، قدرت پیش‌بینی بالاتری نسبت به AHP و روش‌های دیگر دارد.

جدول ۱۰- نتایج همبستگی بین نقاط سیل ثبت شده و نتایج روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

Table 10- Correlation results between recorded flood points and the results of multi-criteria decision making methods

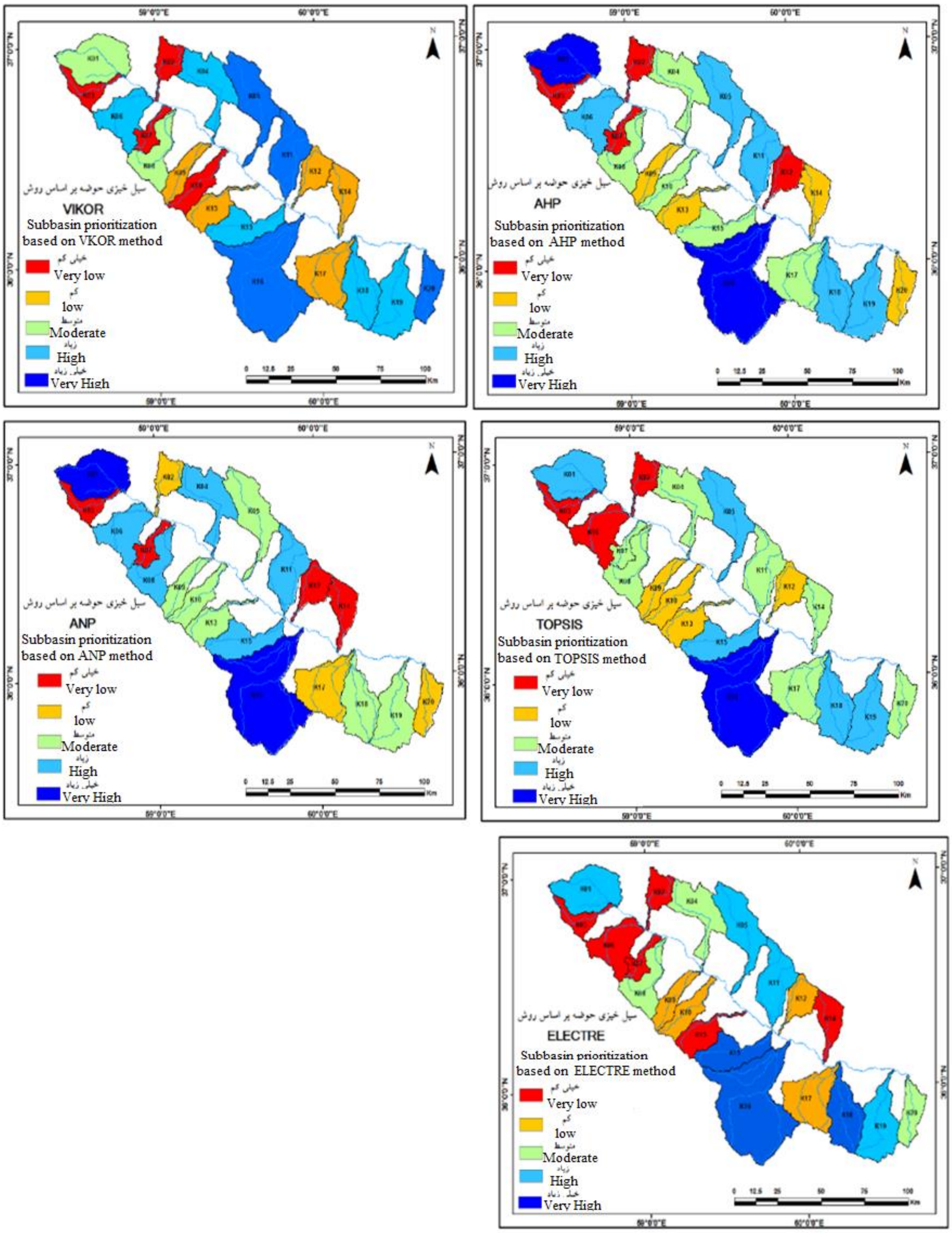
ELECTRE	VIKOR	TOPSIS	AHP	ANP		
0.182	0.569**	0.303	0.671**	.838**	همبستگی اسپیرمن Spearman correlation	سیل‌های ثبت شده Recorded floods
0.443	0.009	0.194	0.001	0.000	سطح معناداری Significant level	
20	20	20	20	20	تعداد Number of data	

.**معنی‌دار در سطح ۱ درصد .*معنی‌دار در سطح ۵ درصد



شکل ۵- درصد مساحت طبقه‌های سیل‌خیزی در هر یک از روش‌های موردمطالعه

Fig.5. The percentage of the flood class area in each of the studied methods



شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی زیرحوضه‌ها بر اساس هر یک از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

Fig.6. Zoning map of sub-basins based on each of the multi-criteria decision making methods

۴-نتیجه‌گیری

ازآنجایی‌که نمی‌توان از مخاطرات طبیعی پیچیده ناشی از سیل به‌طور کامل پیش‌گیری کرد، مهم‌ترین اقداماتی که می‌توان اعمال کرد، اقدامات کاهش اثرات مخرب آن است. تهیه نقشه سیل‌خیزی مرحله‌ای کلیدی در مدل‌سازی سیل و ارزیابی ریسک آن است. با تهیه نقشه حساسیت به سیل، می‌توان مناطق مستعد سیل را شناسایی کرد و از اقدامات ساختاری و غیر سازه‌ای (بیولوژیکی) مناسب برای کاهش خسارات ناشی از سیل استفاده کرد. ازاین‌رو هدف این پژوهش مقایسه ۵ روش تصمیم‌گیری چندمعیاره شامل AHP، ANP، VIKOR، TOPSIS و ELECTRE در تعیین سیل‌خیزی و اولویت‌بندی زیرحوضه‌های‌آبخیز کشف رود در استان خراسان رضوی با استفاده از پارامترهای مورفومتریک بود و درنهایت نتایج مدل‌ها با نقاط سیلاب‌های مشاهداتی در حوضه مورد ارزیابی قرار گرفت. درنهایت با استفاده از شاخص درصد تغییرات و نقاط سیل ثبت شده در منطقه، روش‌های استفاده شده برای طبقه‌بندی سیل‌خیزی زیرحوضه‌ها مورد اعتبار سنجی قرار گرفت. نتایج اعتبار سنجی نشان داد روش تحلیل شبکه (ANP) در بررسی نقاط سیل‌خیز و نتایج روش‌ها، بیشترین همبستگی را با نتایج سایر روش‌ها دارد و اختلاف معنی‌داری بین روش ANP، AHP و VIKOR با نقشه سیل‌خیزی حوضه بر اساس داده‌های مشاهداتی وجود ندارد. در بررسی درصد تغییرات نیز مشخص گردید که کمترین درصد تغییرات مربوط به روش تحلیل شبکه (ANP) است.

نقشه‌های سیل‌خیزی به دست آمده در این پژوهش بر مبنای تعداد محدودی پارامتر مورفومتریک انجام شده است که می‌تواند روی نتایج تحقیق تأثیرگذار باشد؛ ازاین‌رو پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی تعداد بیشتری از پارامترهای مورفومتریک استفاده شود. همچنین استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره با انتخاب طیف گسترده‌ای از روش‌ها و روابط همراه است که این انتخاب می‌تواند در نتایج نهایی تأثیرگذار باشد؛ بنابراین بهتر است محققان به این موضوع نیز بپردازند و درنهایت پیشنهاد می‌شود سایر روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی نیز در تحقیقات بعدی موردتوجه قرار گیرد.

References

Aher, P. D., Adinarayana, J., & Gorantiwar, S. D. (2014). Quantification of morphometric characterization and prioritization for management planning in semi-arid tropics of India: a remote sensing and GIS approach. *Journal of Hydrology*, *511*, 850-860. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.02.028

Ahmed, N., Hoque, M. A. A., Howlader, N., & Pradhan, B. (2022). Flood risk assessment: role of mitigation capacity in spatial flood risk mapping. *Geocarto International*, *37*(25), 8394-8416. https://doi.org/10.1080/10106049.2021.2002422

Akay, H., & Baduna Koçyiğit, M. (2020). Flash flood potential prioritization of sub-basins in an ungauged basin in Turkey using traditional multi-criteria decision-making methods. *Soft Computing*, *24*, 14251-14263. https://doi.org/10.1007/s00500-020-04792-0

Alam, A., Ahmed, B., & Sammonds, P. (2021). Flash flood susceptibility assessment using the parameters of drainage basin morphometry in SE Bangladesh. *Quaternary International*, *575*, 295-307. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.04.047

Al-Saady, Y. I., Al-Suhail, Q. A., Al-Tawash, B. S., & Othman, A. A. (2016). Drainage network extraction and morphometric analysis using remote sensing and GIS mapping techniques (Lesser Zab River Basin, Iraq and Iran). *Environmental Earth Sciences*, *75*, 1243. https://doi.org/10.1007/s12665-016-6038-y

Aouragh, M. H., & Essahlaoui, A. (2018). A TOPSIS approach-based morphometric analysis for sub-watersheds prioritization of high Oum Er-Rbia basin, Morocco. *Spatial Information Research*, *26*, 187-202. https://doi.org/10.1007/s41324-018-0169-z

Arab Ameri, A., Pour Ghasemi, H. R., Rezaei, K., & Sohrabi, M. (2019). Morphometric prioritization of watersheds for optimal water and soil resources management. Iranian Jouranl of Watershed Management Science, 13(45),87-96. [In Persian] http://dorl.net/dor/20.1001.1.20089554.1398.13.45.11.5

Bhat, M. S., Alam, A., Ahmad, S., Farooq, H., & Ahmad, B. (2019). Flood hazard assessment of upper Jhelum basin using morphometric parameters. *Environmental Earth Sciences*, *78*, 1-17. https://doi.org/10.1007/s12665-019-8046-1

Bisht, S., Chaudhry, S., Sharma, S., & Soni, S. (2018). Assessment of flash flood vulnerability zonation through Geospatial technique in high altitude Himalayan watershed, Himachal Pradesh India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *12*, 35-47. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.09.001

Chandrashekar, H., Lokesh, K. V., Sameena, M., & Ranganna, G. (2015). GIS–based morphometric analysis of two reservoir catchments of Arkavati River, Ramanagaram District, Karnataka. *Aquatic Procedia*, *4*, 1345-1353. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.175

Chaulagain, D., Rimal, P. R., Ngando, S. N., Nsafon, B. E. K., Suh, D., & Huh, J. S. (2023). Flood susceptibility mapping of Kathmandu metropolitan city using GIS-based multi-criteria decision analysis. *Ecological Indicators*, *154*, 110653. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110653

Chorley, R. J., Malm, D. E. G., & Pogorzelski, H. A. (1957). A New Standard for Estimating Drainage Basin Shape. *American Journal Science*, *255*, 138-141. https://doi.org/10.2475/ajs.255.2.138

Christopher, O., Idowu, A., & Olugbenga, A. (2010). Hydrological analysis of Onitsha North East drainage Basin using geoinformatic techniques. *World Applied Sciences Journal*, *11*(10), 1297-1302.

De Brito, M. M., Evers, M., & Almoradie, A. D. S. (2018). Participatory flood vulnerability assessment: a multi-criteria approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, *22*(1), 373-390. https://doi.org/10.5194/hess-22-373-2018

Dehghan, P., Hosseinpour Moghadam, M., Lashkaripour, G., & Ghafouri, M. (2012). *Investigating the geomorphological forms of the Kashf River watershed in northeastern Iran.* Paper presented of the 8th Conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment papers, Ferdowsi University of Mashhad, 1659-1666. [In Persian] https://civilica.com/doc/233175

Dou, J., Yamagishi, H., Pourghasemi, H. R., Yunus, A. P., Song, X., Xu, Y., & Zhu, Z. (2015). An integrated artificial neural network model for the landslide susceptibility assessment of Osado Island, Japan. *Natural Hazards*, *78*, 1749-1776. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1799-2

Ganjirad, M., & Delavar, M. R. (2023). Flood risk mapping using random forest and support vector machine. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *10*, 201-208. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W1-2022-201-2023

Ghorbanzade, M., Azarakhshi, M., Mosaedi, A., & Rostami Khalaj, M. (2017). Evaluation of the efficiency of Analytic Hierarchy Process (AHP) to specify the areas with urban flood risk potential, case study: the central part of Torbat Heydarieh. *Physical Geography Research*, *49*(4), 645-656. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.231371.1007037

Hamdan, A. M. (2020). Hydro-morphometric analysis using geospatial technology: A case study of Wadi Gabgaba and Wadi Allaqi watersheds, southern Egypt-northern Sudan. *Journal of Asian Scientific Research*, *10*(3), 190. https://doi.org/10.18488/journal.2.2020.103.190.212

Hejazi, A., Andariani, S., Almaspour, F., & Mokhtari Asl, A. (2015). Using Multi Criteria Decision Making and Remote Sensing Techniques in GIS Environment for Flood Susceptible Zones Assessment in Lighvan Chai Catchment. *Hydrogeomorphology*, *2*(3), 61-80. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1394.2.3.4.5

Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, *56*(3), 275-370. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2

Hosseinzadeh, M. M., Salehi Milani, A. R., & Rezaian Zarandini, F. (2023). Zoning of the sensitivity of the sub-basins of Nekarood basin to flooding, Neka-Mazandaran. *Hydrogeomorphology*, *10*(34), 100-75. [In Persian] https://doi.org/10.22034/hyd.2023.52132.1646

Khosravi, K., Shahabi, H., Pham, B. T., Adamowski, J., Shirzadi, A., Pradhan, B., ... & Prakash, I. (2019). A comparative assessment of flood susceptibility modeling using multi-criteria decision-making analysis and machine learning methods. *Journal of Hydrology*, *573*, 311-323. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.073

Mardani, A., Zavadskas, E. K., Govindan, K., Amat Senin, A., & Jusoh, A. (2016). VIKOR technique: A systematic review of the state of the art literature on methodologies and applications. *Sustainability*, *8*(1), 37. https://doi.org/10.3390/su8010037

Mir Ghafouri, H., Asadian Ardakani, F., & Azizi, F. (2013). *Multi-indicator decision making methods (along with the introduction of application software)*.Tehran: Academic Jihad Publications. [In Persian]

Moghimi, A., Mousavi Harami, S. R., Moatamed, A. & Ahmadi, H. (2010). The study of the effect of morph metric variables on maximum debi of flood in Chalus drainge basin using statistical methods and mathematical models. *Journal of Earth and Resources*, *2*(1), 65-80. [In Persian]

Msabi, M. M., & Makonyo, M. (2021). Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: A case of Dodoma region, central Tanzania. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, *21*, 100445. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100445

Opricovic, S., & Tzeng, G. H. (2007). Extended VIKOR method in comparison with outranking methods. *European Journal of Operational Research*, *178*(2), 514-529. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.01.020

Parvaresh, E., Mahdavi, R., Malekian, A., Esmaeilipoor, Y., & Holisaz, A. (2018). Prioritizing of effective factors in flooding potential using Electre IIIMethod and Flood Flow Coefficient (Case study: Sarkhoon Subwatersheds of Bandarabbas). *Journal of Arid Biome*, *8*(1), 75-87. [In Persian] https://dorl.net/dor/20.1001.1.2008790.1397.8.1.7.4

Rahaman, S. A., Ajeez, S. A., Aruchamy, S., & Jegankumar, R. (2015). Prioritization of sub watershed based on morphometric characteristics using fuzzy analytical hierarchy process and geographical information system–A study of Kallar Watershed, Tamil Nadu. *Aquatic Procedia*, *4*, 1322-1330. https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.172

Rahimpour, T., Rezaei Moghaddam, M. H., Hejazi, S., & Valizadeh Kamran, K. (2023). Analysis of hydrogeomorphic characteristics of sub-basins in terms of erosion sensitivity (Case study: Aland Chai basin, northwest of Iran). *Researches in Earth Sciences*, *14*(3), 112-131. [In Persian] https://doi.org/10.48308/esrj.2023.103507

Razavizadeh, S., & Shahedi, K. (2015). Combination of AHP and TOPSIS methods to prioritize of flooding in Taleghan sub watersheds. *Natural Ecosystems of Iran*, *7*(4), 33-46. [In Persian] https://sanad.iau.ir/fa/Journal/nei/Article/983174

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2006). *Decision making with the analytic network process* (Vol. 282). Berlin, Germany: Springer Science+ Business Media, LLC. https://doi.org/10.1007/0-387-33987-6

Schumm, S. A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological society of America bulletin*, *67*(5), 597-646. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1956)67[597:EODSAS]2.0.CO;2

Sharifi kia, M., Shayan, S., Yamani, M., & Arab Ameri, A. (2018). Classification of Necarod watershed sub-basins using multi-criteria decision-making models, TOPSIS, SAW and VIKOR. Ecohydrology, 5(1), 69-83. [In Persian] https://doi.org/10.22059/ije.2017.231263.550

Sharifi, F. (2002). *Study of flood prevention, containment and control in Golestan Province with watershed management operations and restoration of forests and pastures*.Paper presented of

the first Seminar on mitigate and prevent flooding. [In Persian] https://civilica.com/doc/115846/

Smith, K. (1950). Standards for Grading Textures of Erosional Topography. *American Journal of Science, 248*, 655-668. http://dx.doi.org/10.2475/ajs.248.9.655

Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of Hydrology*, *504*, 69-79. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.034

Teimouri, M., & Alvandi, E. (2022). Comparison of Models TOPSIS, SAW, ELECTRE and VIKOR in order to the prioritization of sedimentation and flood hazard of watersheds. *Journal of Environmental Science and Technology, 24*(2), 79- 99. [In Persian] https://doi.org/10.30495/jest.2022.45404.4731

Zare, H., & Zamzam, F. (2022). *Multi-criteria decision making, methods and applications*. Yazd: Yazd University Press. [In Persian]

Zzaman, R. U., Nowreen, S., Billah, M., & Islam, A. S. (2021). Flood hazard mapping of Sangu River basin in Bangladesh using multi-criteria analysis of hydro-geomorphological factors. *Journal of Flood Risk Management*, *14*(3), e12715. https://doi.org/10.1111/jfr3.12715